

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA EN GERENCIA DE PROYETOS

MAESTRÍA EN GERENCIA DE PROYECTOS



**PROPUESTA DE MEJORA DE LOS PROCESOS DE DEFINICIÓN DEL ALCANCE
Y ESTIMACIÓN DEL TIEMPO EN PROYECTOS DE ANÁLISIS DE
INTEGRIDAD ESTRUCTURAL**

Proyecto de Graduación para optar por el grado de Máster en Gerencia de Proyectos

Realizado por:

Luis Correal Gómez

Profesor Guía:

Edgar Hernández

Febrero, 2012

ACTA DE DEFENSA PÚBLICA

Este Proyecto Final de Graduación fue aprobado por el Tecnológico de Costa Rica como requisito final para optar por el grado de Máster en Gerencia de Proyectos con Énfasis en Proyectos Empresariales.

Firmas de aprobación

Representante Comité Técnico

Edgar Hernández

Lector

Lector

Luis Correal

DEDICATORIA

A mi madre y a mi padre que me han apoyado incondicionalmente a lo largo del camino. Gracias por brindarme lo más importante; las oportunidades.

Este es un logro en equipo.

Luis.

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa. Gracias. Una luz en mi vida y un gran ejemplo.

Tu compañía, tu amor y tu apoyo han sido pilares y mi fuerza para emprender este
proyecto y muchos más.

Porque sigamos emprendiendo siempre nuevos proyectos.

Luis.

EPÍGRAFE

“El futuro tiene muchos nombres.

Para los débiles es lo inalcanzable.

Para los temerosos, lo desconocido.

Para los valientes es la oportunidad”

Víctor Hugo (1802-1855)

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	3
A. MARCO DE REFERENCIA EMPRESARIAL	3
1. Antecedentes.....	3
2. Situación actual	5
3. Servicios	6
4. Misión y Visión.....	6
B. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	7
C. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
D. OBJETIVOS.....	11
1. Objetivo General.....	11
2. Objetivos Específicos	11
E. ALCANCE	12
F. LIMITACIONES.....	15
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO/CONCEPTUAL	16
A. FUNDAMENTOS DE LA DIRECCIÓN DE PROYECTOS.....	17
1. Definición de Proyecto.....	17
2. Dirección de Proyectos.....	17
3. Controlar el Alcance	18
4. Grupo de Procesos de Planificación.....	18
B. Fundamentos del Diseño en Ingeniería y la Integridad Estructural.....	20
1. Análisis de Integridad Estructural	20

2.	Seguridad y responsabilidad legal	21
3.	Modos de Falla	22
4.	Generalidades del Método de Elementos Finitos	23
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO		26
A.	Tipo de Investigación	26
B.	Fuentes y Sujetos de Información.....	27
1.	Fuentes de Información	27
2.	Los sujetos de información	28
C.	Técnicas de Investigación.....	29
1.	Consulta de la documentación de referencia y bibliografía	29
2.	Entrevista.....	29
3.	Grupo de Opinión	30
D.	Procesamiento y Análisis de Datos.....	31
CAPÍTULO IV. PROPUESTA.....		34
E.	Análisis de Situación Actual	34
1.	La entrevista	34
2.	Grupo de Opinión	34
F.	Propuesta de Solución.....	48
1.	Proceso de definición del alcance	50
2.	Modelo probabilístico para la estimación de tiempo	53
3.	Proceso de identificación y análisis de riesgos.....	57
4.	Proceso para el control de cambios.....	62
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		64
G.	Conclusiones	64

H. Recomendaciones	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
A. Bibliografía Citada.....	70
B. Bibliografía Consultada	71
C. Bibliografía de Internet.....	72
APÉNDICES	73
ANEXOS	91

ÍNDICE DE CUADROS Y GRÁFICOS

Cuadro 1. Grupo de Procesos de Planificación, cuadro resumen.....	19
Cuadro 2. Algunas Consideraciones de Diseño.....	21
Cuadro 3. Modos de Falla por Carga Estática	22
Cuadro 4. Modos de Falla por Carga Variable	22
Cuadro 5. Escala relativa para cuantificación de la incertidumbre en las estimaciones de tiempo.	32
Cuadro 6. Escala relativa para cuantificación de la incertidumbre en la definición del alcance e identificación del riesgo.....	32
Cuadro 7. Resumen, lista de actividades de proyecto AIE	35
Cuadro 8. Identificación y cuantificación de los factores de incertidumbre en la estimación de tiempo.	40
Cuadro 9. Identificación y cuantificación de los factores de incertidumbre en la definición del alcance.....	43
Cuadro 10. Identificación y cuantificación de los aspectos que intervienen en el riesgo de la no convergencia.	45
Cuadro 11. Códigos de los documentos de los procesos	49
Cuadro 12. Mapa del Proceso para la Definición del Alcance	50
Cuadro 13. Tabla de complejidad del análisis vs exposición al riesgo de no convergencia según tipo de análisis y enfoque.....	52
Cuadro 14. Mapa del proceso para la estimación del tiempo por medio de un modelo probabilístico.....	53
Cuadro 15. Mapa del proceso para la identificación y respuesta a los riesgos.....	57
Cuadro 16. Matriz de identificación y respuesta a los riesgos	58

Cuadro 17. Códigos para categorías de riesgo.....	60
Cuadro 18. Plantilla de reporte por materialización de riesgos	61
Cuadro 19. Mapa del proceso para el control de cambios	62
Cuadro 20. Platilla para la solicitud de cambio	63
Cuadro 21. Caso real, modelo determinístico vs PERT.....	66
Cuadro 22. Lista de Actividades puntuales que componen un proyecto típico de análisis de integridad estructural por medio del método del elemento finito.	78
Cuadro 23. Matriz de Probabilidad e impacto	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Árbol del Problema	9
Figura 2. Ejemplo de continuo vs. Discreto	24
Figura 3. Diagrama de red de un proyecto típico de AIE por el MEF	37
Figura 4. Simbología utilizada en diagramas de red	46
Figura 5. Diagrama de Red de un proyecto típico AIE por el MEF con factores de incertidumbre para estimación de tiempo, definición del alcance e identificación de elementos de riesgo.....	47
Figura 6. Herramienta para estimación de tiempos, PERT	55
Figura 7. Nomenclatura y Ecuaciones, Método PERT	93

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice 1. Entrevistas, Technomeca.....	73
Apéndice 2. Resultado 1, grupo de opinión.	78
Apéndice 3. Escala relativa utilizada para análisis cualitativo.....	81
Apéndice 4. Ejemplo de Matriz de Riesgos.....	85
Apéndice 5. Estimación y resultados de un proyecto de entrenamiento.	87

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Grupos de Procesos y Áreas de Conocimiento	92
Anexo 2. Ecuaciones utilizadas para el proceso de estimación de tiempos por medio de un modelo probabilístico.	93

ABREVIATURAS

AIE: Análisis de la Integridad Estructural

AP: Administración de Proyectos

EDT: Estructura de Desglose del Trabajo

FEA: Análisis de Elemento Finito (por sus siglas en inglés “Finite Element Analysis”)

FEM: Modelo de Elementos Finitos (por sus siglas en inglés “Finite Element Model”)

HHRR: Recursos Humanos (por sus siglas en inglés “Human Resources”)

MAP: Máster en Administración de Proyectos

MEF: Método del Elemento Finito

MRL: Nivel de Madurez de la Fabricación (por sus siglas en inglés “Manufacturing Readiness Level”)

OEM: Fabricante de Equipamiento Original (por sus siglas en inglés “Original Engineering Manufacturer”)

PERT: Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (por sus siglas en inglés “Program Evaluation and Review Technique”)

PM: Director de Proyecto (por sus siglas en inglés “Project Manager”)

PMBOK®: Libro de Conocimiento de Administración de Proyectos (por sus siglas en inglés “Project Management Book of Knowledge”)

PMI®: Instituto de Administración de Proyectos (por sus siglas en inglés “Project Management Institute”)

PMO: Oficina de Dirección de Proyectos (por sus siglas en inglés “Project Management Office”)

PMP: Profesional en Gestión de Proyectos (por sus siglas en inglés “Project Management Professional”)

TIER: Clasificación por niveles de suplidores para las OEM's

TL: Líder Técnico (por sus siglas en inglés “Technical Lead”)

TRL: Nivel de Madurez de la Tecnología (por sus siglas en inglés “Technology Readiness Level”)

DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Ámbito de Responsabilidad

Toda la información contenida en este trabajo de investigación ha sido previamente revisada y su uso ha sido autorizado por Soluciones de Ingeniería Technomeca S.A., y pretenden servir como evidencia para la valoración del cumplimiento de requisitos académicos de graduación del Programa de Maestría en Gerencia de Proyectos del Tecnológico de Costa Rica, con sede principal en Cartago, Costa Rica. Los conceptos, juicios e interpretaciones presentadas en el mismo son particulares del autor del documento y no reflejan en ningún momento la posición oficial de la Universidad o de la empresa Soluciones de Ingeniería Technomeca S.A.

Ámbito de Confidencialidad

En este documento se utilizan herramientas de desarrollo propio, datos e información exclusiva de la compañía Technomeca S.A., que puede ser sensible para sus fines comerciales; el lector de este documento reconoce que la información aquí contenida es estrictamente confidencial, de uso restringido y estrictamente para fines académicos.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de este documento para efectos que no sean estrictamente académicos.

RESUMEN

El lector de este documento encontrará aquí una propuesta de mejora para fortalecer los procesos de definición del alcance, estimaciones iniciales de tiempo, identificación y respuesta a los riesgos y control de cambios para proyectos de análisis de integridad estructural (AIE) desarrollados en la empresa Soluciones de Ingeniería Technomeca S.A.

El problema central en este momento para esta empresa radica en las dificultades e inconsistencias entre las propuestas iniciales realizadas y los resultados finales de los proyectos. La intención general de esta empresa, es poder pasar de una cultura de trabajo por “pulso” hacia una cultura de trabajo administrada. Esto frente a la carencia de procesos formales en el tema de la administración de proyectos.

Esta empresa reconoce la importancia de incorporar el tema de la administración de proyectos a su cultura de trabajo y ha decidido emprender este proceso de cambio, empezando por fortalecer las áreas donde presenta una necesidad más inmediata.

Aunque esta empresa se dedica a brindar diversos servicios de ingeniería, la propuesta de mejora desarrollada en este documento se enfoca muy puntualmente en los proyectos de análisis de integridad estructural dado que representan la mayor parte de los proyectos realizados por Technomeca en aproximadamente un 70% de los ingresos y recursos; y este servicio es el elemento diferenciador para esta empresa en Costa Rica ante su complejidad y escasez. Esto como un primer paso para introducir a la organización gradualmente en el tema de la administración de proyectos y que eventualmente pueda extrapolarse a otros servicios, a otros grupos de procesos y por ende servir de insumo para continuar fortaleciendo el tema de la administración de proyectos dentro de la organización.

PALABRAS CLAVE

Integridad Estructural, Análisis de Elementos Finitos, Propuesta de Mejora, Administración de Proyectos, Ingeniería Asistida por Computadora.

ABSTRACT

The reader of this document will find a process improvement proposal to strengthen the scope definition process, initial time estimates, risk identification and response, and changes control for structural analysis projects developed at Technomeca S.A.

The main problem currently faced by this company resides on the difficulties and inconsistencies between the initial baselines and the project end result.

Overall intention is to be able to transition from just a technical perspective and technical driven working culture to a technical/administrated working culture since Technomeca faces a complete lack of formal processes of project management.

This company has recognized the importance and potential benefits of incorporating Project Management best practices to its working culture and has decided to start this initiative by strengthening its immediate need areas.

Although this company provides different engineering services, the improvement proposal is oriented specifically towards structural analysis projects since these comprehend the majority of the company's workload and also gives Technomeca a competitive edge due to the complexity and lack of this type of engineering service in Costa Rica. This approach will serve as a first step to gradually introduce the company into Project Management activities while addressing their primary need.

KEYWORDS

Structural Integrity, Finite Element Analysis, Improvement Proposal, Project Management, Computer Aided Engineering.

INTRODUCCIÓN

A partir la de aparición formal de los conceptos de seguridad y responsabilidad legal sobre los productos fabricados donde se expresa que “el fabricante de un artículo es legalmente responsable por cualquier daño o perjuicio que resulte debido a un defecto. Y no importa si el fabricante sabía acerca del defecto o incluso si no sabía” (Shigley, 2002, p. 20), los temas de análisis de la integridad estructural empezaron a ganar cada vez más fuerza.

Ya sea por medio de métodos empíricos, juicio experto, ensayos, soluciones analíticas, modelos matemáticos, ingeniería asistida por computadora o la combinación de todas éstas, resulta necesario un entendimiento acerca del comportamiento de los diseños en su entorno de operación.

La utilización de métodos numéricos como el análisis por elementos finitos y las herramientas de ingeniería asistida por computadora son cada vez más utilizadas y toman más fuerza conforme avanzan las capacidades de procesamiento de datos y las tecnologías de la información.

En Costa Rica, la utilización de este tipo de herramientas y técnicas está dando pasos iniciales y desafortunadamente la responsabilidad de su uso se toma con ligereza debido a la combinación de falta de profundidad de conocimiento con interfaces gráficas muy amigables.

Son escasas las empresas en el país que hoy se dedican a brindar este tipo de servicios de ingeniería. La falta de competencia hace que la demanda recurra a la poca oferta existente en el país, y típicamente se subcontratan estos servicios a precios muy elevados a compañías en otros países.

A pesar de que las valoraciones de integridad estructural por el método de elementos finitos son requisito para algunos proyectos por el tema de políticas de calidad y de

seguridad, el cliente en muchos de los casos no cuenta con personal que interprete y valore la confiabilidad del producto final que está recibiendo.

El tema de la administración de proyectos ha tomado fuerza de forma importante en las últimas décadas, y hoy más que una buena práctica que podría emprenderse, se percibe más cómo una verdadera necesidad.

Frente a la necesidad más inmediata de esta empresa se realiza una propuesta de mejora muy puntual orientada a cerrar las brechas entre el alcance definido y las estimaciones iniciales en tiempo, y el resultado final de los proyectos de análisis de integridad estructural por el método del elemento finito; fortaleciendo los procesos de definición del alcance, estimación de tiempos, identificación y respuesta a los riesgos y control de cambios.

La compañía Soluciones de Ingeniería Technomeca S.A., reconoce la importancia de emprender un proceso en el desarrollo de una cultura de trabajo proyectizada para brindar un mejor servicio a sus clientes y para generar escenarios propicios para aumentar las probabilidades de éxito de sus proyectos. Este proyecto final de graduación pretende ser un primer paso en este proceso y objetivo estratégico de mediano plazo.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

El capítulo I, aborda las generalidades de este proyecto de graduación y trabajo de investigación.

Para realizar una contextualización se detalla el marco de referencia empresarial, así como la necesidad a la que responde el proyecto mediante el planteamiento del problema y su justificación de estudio.

Se realiza aquí adicionalmente la definición de los objetivos que responden a dicha necesidad así como el alcance y limitaciones con las que cuenta este proyecto.

A. MARCO DE REFERENCIA EMPRESARIAL

1. Antecedentes

La compañía de servicios de ingeniería Technomeca S.A., es una compañía fundada a mediados del año 2011 para atender una demanda importante en servicios de ingeniería en los temas de diseño mecánico detallado y análisis estructural frente a la carencia de oferta en el país.

Sus miembros fundadores han trabajado para la industria aeroespacial y de energía en múltiples programas para las más grandes OEM's y TIER's del mundo, en proyectos de diseño mecánico detallado, análisis estructural y transferencia de calor primordialmente, mediante herramientas de ingeniería asistida por computadora y métodos de modelado matemático de fenómenos físicos por el método de elementos finitos; específicamente en el desarrollo de motores a reacción, turbinas de gas y tecnologías asociadas.

Estos programas típicamente involucran, decenas de proyectos, miles de colaboradores, varios cientos de millones de dólares, períodos entre 4 y 10 años para llevar los productos a través de los niveles TRL y MRL , altos requerimientos de competencias técnicas, tecnológicas, equipos internacionales de trabajo virtual, donde la connotación del tema de la administración de proyectos toma una relevancia trascendental como eje transversal en el éxito de cada proyecto en su contribución al éxito general del programa.

Después de determinar la necesidad existente en Costa Rica de servicios de ingeniería en temas de diseño mecánico detallado, valoraciones de integridad estructural, estimaciones de vida útil, entre otros; versus la carencia de oferta de servicios en estas áreas particulares, los miembros fundadores de la empresa decidieron agruparse a fin de sumar fuerzas, experiencia, consolidar una imagen empresarial y poder tener una mejor proyección hacia este nicho de mercado tanto en Costa Rica cómo hacia la región Centro y Sur Americana.

Fuente: Consultores Technomeca

2. Situación actual

Actualmente la empresa participa en el desarrollo de algunos proyectos y se encuentra a la espera de poder iniciar nuevos proyectos que han sido pospuestos. Technomeca pretende enfrentar sus nuevos proyectos no sólo con la fortaleza técnica demostrada anteriormente, sino con un acompañamiento y profesionalismo en el campo de la administración de proyectos, empezando por fortalecer su proceso de planificación.

La oferta de servicios que proporciona esta compañía, sus técnicas y herramientas desde una perspectiva técnica, son todavía incipientes en Costa Rica, y su valor agregado radica en que brinda a sus clientes insumos para la toma de decisiones de diseño. Esto le brinda una excelente proyección hacia el mercado.

La percepción general dentro de esta empresa es que la calidad del trabajo y la fortaleza técnica acompañados de una adecuada gestión en administración de proyectos abre importante oportunidad de mejora.

Es para esta empresa un objetivo estratégico de mediano plazo incorporar el tema de la administración de proyectos a su cultura organizacional de trabajo a fin de ofrecer más valor agregado a sus clientes.

Fuente: Consultores Technomeca

3. Servicios

Dentro de los servicios de ingeniería ofrecidos actualmente se encuentran:

- Desarrollo Conceptual
- Análisis de Integridad Estructural (Sobre este servicio se desarrolla la propuesta de mejora de este proyecto final de graduación)
- Estimaciones de Vida Útil
- Transferencia de Calor
- Sistemas Dinámicos y Vibraciones
- Instalaciones Mecánicas
- Análisis de Causa Raíz

Fuente: Consultores Technomeca

4. Misión y Visión

Misión: “Proveer a nuestros clientes de valiosas herramientas para la toma de decisiones, generación de alternativas, mejora de sus diseños y optimización de sus productos a través de nuestros servicios de ingeniería de alto valor agregado y calidad.”

Visión: “Ser una empresa de proyección internacional distinguida por proveer a sus clientes de soluciones de ingeniería de alto valor agregado a través de una excelente gestión de la calidad en sus servicios, profundidad de sus competencias técnicas y atención a los detalles.”

Fuente: Consultores Technomeca

B. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

De las consultorías realizadas por Technomeca en el pasado, no se ha logrado congruencia con las estimaciones de tiempo y definición del alcance con los resultados finales, esto debido a diversas causas a discutir más adelante.

Es importante destacar que estas consultorías no han seguido un proceso estándar de estimación y en general se carece de herramientas para la administración de proyectos.

Para la organización resulta necesario pasar de una cultura de trabajo por “pulso” a una cultura de trabajo administrada que minimice estas diferencias entre lo estimado y lo ejecutado; esto empezando por fortalecer el proceso de estimación de tiempos y en una mejor gestión del alcance, que son las necesidades inmediatas de la organización.

A manera de ejemplo, un proyecto de diseño mecánico detallado de un laboratorio de pruebas para quemadores de turbinas de gas de diversos tamaños, pasó de un tiempo inicial estimado de un año y dos meses, a una duración total de casi tres años y medio, y de un costo inicial de dos y medio millones de dólares a casi cinco.

Un proyecto de valoración de integridad estructural realizado para determinar la necesidad de rediseñar o reemplazar un componente de un producto en una empresa de la industria de energía, excedió el tiempo estimado en aproximadamente un trescientos por ciento, el costo en un ochenta por ciento y el número de productos entregables en un setenta y cinco por ciento.

La calidad del trabajo realizado y la profundidad de las competencias técnicas sigue siendo la carta de presentación de esta empresa y la percepción general es que acompañado esto de una cultura y mentalidad de trabajo proyectizada se abre un importante potencial de mejora tanto para la organización misma a nivel interno, cómo para brindar un mejor servicio hacia lo externo.

La empresa Technomeca ha fijado cómo un objetivo estratégico de corto plazo el mejorar y fortalecer sus procesos de estimación de tiempo, de definición del alcance, de identificación y respuesta a los riesgos y del control de cambios, dado que representan los aspectos más sensibles en la relación con sus clientes, y es en este objetivo de corto plazo que se concentra el objeto de estudio de este proyecto final de graduación, mediante propuestas puntuales de mejora que atiendan dicha necesidad.

C. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

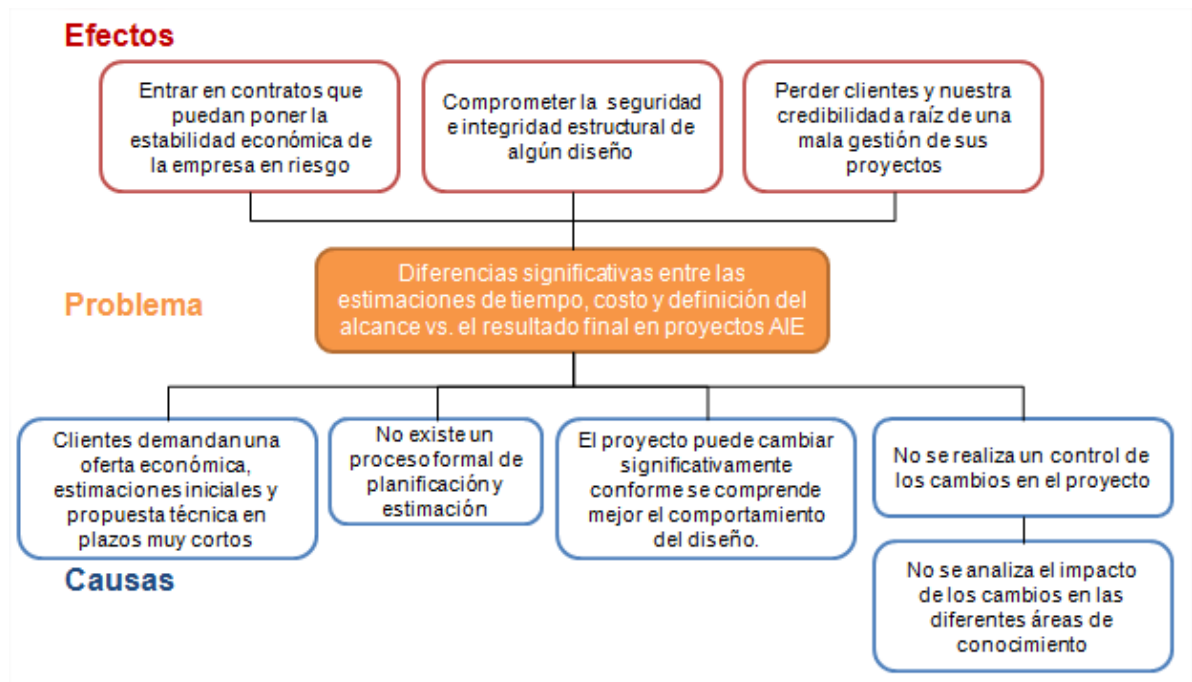


Figura 1. Árbol del Problema

Fuente: Elaboración Propia

Cómo se ha descrito con anterioridad, el aspecto medular del problema recae sobre la brecha entre las estimaciones iniciales de tiempo así como en la definición inicial del alcance, versus el resultado final en proyectos de análisis estructural.

De un análisis mediante un árbol del problema cómo puede observarse de la figura anterior, son varios los aspectos que contribuyen a este problema medular, cómo las deficiencias en el proceso de planificación, la naturaleza altamente cambiante de los proyectos de diseño y la ausencia en dar gestión a y trazabilidad a estos cambios, no identificar oportunamente los riesgos, por citar algunos.

Todo esto podría tener efectos contraproducentes para la organización; desde entrar en contratos que puedan poner la estabilidad económica de la empresa en riesgo, hasta llegar a perder clientela en el mejor de los casos. En el peor de los escenarios, llegar a comprometer la seguridad de algún diseño y poner en peligro vidas humanas.

D. OBJETIVOS

1. Objetivo General

Definir un conjunto de procesos para la gestión de proyectos de análisis de integridad estructural con el objetivo de disminuir la incertidumbre y la cantidad de cambios no controlados asociados a las áreas de alcance y tiempo; logrando así una mayor probabilidad de éxito en este tipo de proyectos en la empresa Technomeca.

2. Objetivos Específicos

- Identificar los elementos en el ciclo de vida de un proyecto de análisis de integridad estructural que introducen más variabilidad en las estimaciones de tiempo y definición del alcance.
- Proponer un proceso para la definición del alcance que haga énfasis en los aspectos más propensos a cambios durante el desarrollo del proyecto.
- Proponer un modelo de estimación de tiempo que se ajuste a los proyectos de análisis de integridad estructural.
- Proponer un proceso de identificación y análisis de riesgos, que tome en cuenta los posibles efectos en las desviaciones de tiempo y alcance para disminuir el nivel de incertidumbre y cambios en los proyectos de análisis de integridad estructural.
- Proponer un proceso de control de cambios que permita la gestión de los mismos, el análisis de su impacto y su trazabilidad.

E. ALCANCE

El alcance de este proyecto final de graduación se debe orientar en dos sentidos amplios, el primero sobre la delimitación dentro del área técnica y el segundo sobre la delimitación en temas de la administración de proyectos.

- De los diferentes servicios ofrecidos por la empresa Soluciones de Ingeniería Technomeca S.A., este proyecto final de graduación se enfoca únicamente en los proyectos de análisis de integridad estructural.
- De los diferentes métodos para estudiar la integridad estructural, este proyecto final de graduación sólo contempla los realizados por medio del método del elemento finito, esto debido a que representan la mayoría de proyectos realizados por Technomeca, y es el servicio diferenciador de esta compañía ya que son muy pocas las empresas que cuentan con esta capacidad técnica.
- La propuesta de mejora está orientada en fortalecer:
 - La estimación de tiempos
 - La definición y construcción del alcance

Para lograr una mejora significativa en las dos áreas anteriores de alcance y tiempo, este trabajo se enfocará principalmente en la identificación y análisis de riesgos y en el control integrado de cambios como mecanismos para reducir las desviaciones entre los estimados originales de estas dos variables y lo que ocurre finalmente en los proyectos de análisis de integridad estructural, por lo que se incluirá dentro de este alcance:

- Proceso de identificación, análisis y respuesta a los riesgos
- Proceso de control integrado de cambios

Aunque en general, la visión de largo plazo es fortalecer el tema de administración de proyectos en sus diversas áreas de conocimiento y grupos de procesos; los procesos puntuales en los que se enfoca este proyecto final de graduación (alcance y tiempo) representan una necesidad inmediata para la empresa cómo se ha

explicado en la sección de planteamiento del problema. Adicionalmente, el fortalecimiento en estas cuatro áreas que hemos definido en el alcance de este trabajo final de graduación, brinda una introducción paulatina a la organización sobre las ventajas en la utilización de herramientas y procesos en la administración de proyectos.

No es la intención de este proyecto final de graduación brindar una propuesta tan comprehensiva y amplia que encuentre poca aplicabilidad práctica dentro de la organización. Los otros procesos en las diversas áreas de conocimiento de proyectos se dejan para un desarrollo posterior por parte de la empresa y forman parte de las recomendaciones generales de este trabajo.

Algunas otras consideraciones importantes a la hora de elegir los procesos de necesidad inmediata se hicieron basadas en lo siguiente:

- Para el tema de gestión de la calidad, la empresa ya cuenta con un proceso de planificación y de verificación de resultados y de productos entregables, por lo tanto no se contempla dentro del alcance de este proyecto final de graduación.
- En relación al tema de la gestión de los costos; se ha decidido no incluirlo dentro del alcance de este proyecto final de graduación dado que tiene una relación directa con el tiempo, dado que se basa en horas profesionales y por esta razón, al realizar una mejor estimación de tiempos y de definición del alcance, directamente se está realizando una mejor estimación sobre los costos.
- El tema de la gestión de los recursos humanos no representa una necesidad inmediata dado el pequeño tamaño de la empresa, que actualmente se conforma de sus tres consultores, por lo que esto ya funciona de una forma ágil y sin contratiempos para Technomeca.
- El tema de la gestión de las comunicaciones no representa una necesidad inmediata, ya se cuenta con procedimientos de reporte y de reuniones

semanales de personal y con el cliente que han demostrado efectividad hasta el momento.

- La gestión de las adquisiciones, de forma análoga al tema de recursos humanos, dado el tamaño de la organización sumado a que se trabaja primordialmente por horas profesionales, no se considera un factor de necesidad primaria.
- Fuera de los procesos de planificación, solamente se incluye un proceso más de control para dar gestión a los cambios que sufra el alcance y estimar el impacto en tiempo, mediante un control integrado de cambios; dado que en estos momentos para esta empresa, los procesos asociados a la iniciación, ejecución y cierre de los proyectos están funcionando de manera satisfactoria.

F. LIMITACIONES

- Algunos de los temas técnicos con lo que se debe trabajar, son muy especializados, por lo que la información disponible es escasa y debe recurrirse al juicio experto.
- La información a recopilar para algunos de los temas de caracterización de proyectos típicos AIE depende en gran medida del aporte de la empresa Soluciones de Ingeniería Technomeca S.A.
- El éxito de este proyecto de investigación depende en gran medida de la disponibilidad, disposición, aporte y trabajo en equipo que se desarrolle con el grupo de consultores de la empresa Technomeca.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO/CONCEPTUAL

Este segundo capítulo del trabajo contiene la sustentación teórica y conceptual de los temas tratados a lo largo de esta investigación. Una descripción general más horizontal sobre la administración de proyectos y más vertical en el sentido de las áreas de conocimiento pertinentes, así como herramientas asociadas.

Dado que el tema de la administración de proyectos ha tomado cada vez más fuerza, la literatura es amplia, por lo que se ha hecho referencia a diversas fuentes bibliográficas, sin embargo el foco de atención recae sobre el cuerpo de conocimiento en administración de proyectos del PMI®. Los estudios formales realizados a lo largo de la Maestría en Gerencia de Proyectos del Instituto Tecnológico de Costa Rica, también forman parte de este marco teórico/conceptual.

También es necesario referenciar teoría de una forma más general en el tema de la integridad estructural, modos de falla, ingeniería asistida por computadora y el método del elemento finito, pues el trabajo sobre la administración de proyectos será orientado en esta dirección.

En el presente apartado se brindan conceptos relacionados con:

- Administración de Proyectos
- Grupo de Procesos de Planificación y el proceso de Control de Cambios
- Análisis de Integridad Estructural
- Método de Elementos Finitos

A. FUNDAMENTOS DE LA DIRECCIÓN DE PROYECTOS

1. Definición de Proyecto

Según la Guía del PMBOK® “un proyecto es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único” (PMI®, 2008, p.5).

Según Y. Chamoun un proyecto se define como “un conjunto de esfuerzos temporales, dirigidos a generar un producto o servicio único” (Y. Chamoun, 2002, p. 27).

Según IPMA®, un proyecto “es una operación limitada en tiempo y coste para materializar un conjunto de entregables definidos de acuerdo con unos requisitos y estándares de calidad” (IPMA®, 2009, p. 31).

Para efectos de este trabajo final de graduación, entiéndase proyectos en el contexto de los proyectos de análisis de integridad estructural por el método del elemento finito, donde el esfuerzo temporal y limitado se centra en estudiar los fenómenos físicos que intervienen en la vida y operación de un componente estructural por medio de modelos matemáticos; y el producto, conjunto de entregables, servicio o resultado único comprende un diagnóstico en relación a su integridad estructural y vida útil.

2. Dirección de Proyectos

Entiéndase según el enfoque del PMI® en su Guía del PMBOK® a la dirección de proyectos cómo “la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para cumplir con los requisitos del mismo. Se logra mediante la aplicación e integración adecuadas de los 42 procesos de la dirección de proyectos, agrupados lógicamente, que conforman los 5 grupos de procesos” (PMI®, 2008, p. 6).

Estos cinco grupos de procesos son los de Iniciación, Planificación, Ejecución, Seguimiento y Control, y Cierre.

El Anexo 1 muestra en una matriz la relación de los cinco grupos de procesos y de las nueve áreas de conocimiento; donde se ha resaltado con color naranja los procesos que se abordan en este proyecto final de graduación en su propuesta de mejora.

La dirección de proyectos por lo general implica la identificación de requisitos, abordar las necesidades, inquietudes y expectativas de los interesados según se planifica y efectúa el proyecto, equilibrando las restricciones.

Resulta importante además el tema de la flexibilidad dado la naturaleza cambiante de los proyectos, por lo que su desarrollo del plan debe ser iterativo y revisado constantemente a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

3. Controlar el Alcance

Entiéndase para efectos de este proyecto final de graduación el controlar el alcance como el proceso por el cual se monitorea el estado del alcance del proyecto y del producto, y se gestionan cambios a la línea base del alcance (PMBOK®, p. 62)

4. Grupo de Procesos de Planificación

El grupo de procesos de planificación consiste de aquellos procesos requeridos para establecer el alcance del proyecto, refinar los objetivos y definir el curso de acción necesario para alcanzar los objetivos para cuyo logro se emprendió el proyecto.

Según el enfoque del PMBOK®, este grupo lo componen los procesos que llevan a establecer el alcance total del esfuerzo, la definición de los objetivos y la línea de acción requerida para desarrollar el plan para la dirección del proyecto que se compone de los siguientes elementos, que para efectos de este proyecto final de graduación se entenderán cómo se muestra en el siguiente cuadro resumen:

Cuadro 1. Grupo de Procesos de Planificación, cuadro resumen

Áreas de Conocimiento	Grupo de Procesos de Planificación	
	Actividad	Descripción
Alcance	Recopilar requisitos	Definir y documentar necesidades
	Definir el alcance	Descripción detallada del proyecto y productos
	Crear la EDT	Subdividir los entregables
Tiempo	Definir las actividades	Identificar las acciones
	Secuenciar las actividades	Identificar relaciones entre actividades
	Estimar los recursos de las actividades	Estimar materiales, personas, equipos, suministros
	Estimar la duración de las actividades	Establecer períodos de trabajo
	Desarrollar el cronograma	Orden de actividades, duración, recursos y restricciones
Costo	Estimar los costos	Aproximación de recursos monetarios
	Determinar el presupuesto	Sumar costos estimados, establecer línea base
Calidad	Planificar la calidad	Identifica requisitos de calidad de proyecto y/o producto, documenta la manera en que se demostrará el cumplimiento
Recursos Humanos	Desarrollar el plan de RRHH	Roles, responsabilidades, autoridades, habilidades requeridas y relaciones de comunicación
Comunicaciones	Planificar las comunicaciones	Determinar necesidades de información de los interesados y el medio
Riesgos	Planificar la gestión de riesgos	Cómo realizar las actividades de gestión de riesgos
	Identificar los riesgos	Determina riesgos que pueden afectar el proyecto y sus característica
	Realizar el análisis cualitativo de riesgos	Priorizar riesgos evaluando y combinando al probabilidad de ocurrencia y el impacto de dicho riesgo
	Realizar el análisis cuantitativo de riesgos	Analizar numéricamente el efecto de los riesgos sobre los objetivos del proyecto
	Planificar la respuesta a los riesgos	Se desarrollan opciones y acciones para mejorar oportunidades y reducir amenazas
Adquisiciones	Planificar las adquisiciones	Documentar las decisiones de compra

Fuente: Elaboración propia basado en la Guía del PMBOK®

B. Fundamentos del Diseño en Ingeniería y la Integridad Estructural

1. Análisis de Integridad Estructural

Este trabajo se enfoca en proyectos de análisis de integridad estructural, dada su importancia fundamental en los temas de seguridad y responsabilidad legal, en lo escaso que es este servicio en Costa Rica, en que representa el servicio diferenciador para Technomeca y en que es a su vez una de las partes críticas que compone los proyectos de diseño complejo en ingeniería.

El diseño en la ingeniería aeronáutica, espacial, mecánica, entre otras, se asocia con la producción y el procesamiento de la energía en sus diferentes formas. El conocimiento es amplio y cada temática involucrada en el aspecto de diseño alcanza grandes niveles de especialización entre disciplinas como la mecánica de sólidos, dinámica de fluidos, transferencia de calor, flujo secundario, aerodinámica, ciencia y tecnología de materiales, procesos de fabricación, análisis estructural, por citar algunos.

Estas valoraciones de integridad estructural sin duda, llegan a ser tan complejas que son verdaderos proyectos de ingeniería por sí solos.

“Algunas veces la resistencia requerida de un elemento de un sistema significa un factor importante en la determinación de la geometría y dimensiones del elemento. En esa situación se dice que la resistencia es una consideración de diseño importante” (Shigley, 2002, p. 16).

Son muchas las características que intervienen en las consideraciones de diseño, entre éstas:

Cuadro 2. Algunas Consideraciones de Diseño

Características y Consideraciones de Diseño				
Resistencia/esfuerzo	Fricción	Peso	Tamaño	Comercialización
Distorsión/deflexión/K	Facilidad de uso	Vida	Control	Mantenimiento
Desgaste	Utilidad	Ruido	Propiedades Térmicas	Volumen
Corrosión	Costo	Estilo	Superficie	Responsabilidad legal
Seguridad/Confiabilidad	Procesamiento	Forma	Lubricación	Desecho/reciclado

Fuente: Elaboración propia con base en Shigley, 2002.

2. Seguridad y responsabilidad legal

“En este concepto se expresa que el fabricante de un artículo es legalmente responsable por cualquier daño o perjuicio que resulte debido a un defecto. Y no importa si el fabricante sabía acerca del defecto o incluso si no sabía” (Shigley, 2002, p. 20).

Debido a esto, los diseñadores y fabricantes de diversos productos y aplicaciones deben pasar por una etapa de aseguramiento de la integridad estructural de sus diseños utilizando una combinación entre soluciones analíticas, métodos numéricos, experiencia, juicio experto, ensayos, métodos empíricos, entre otros, para determinar si un diseño es funcional, seguro y confiable.

La confiabilidad en el diseño recae en la relación que se da entre las resistencias y la determinación de la distribución de esfuerzos y sus modos de falla asociados.

3. Modos de Falla

Para enfrentar el tema de la prevención de fallas, es necesario entender las características y propiedades físicas y mecánicas de los materiales, así como entender los diferentes tipos de fallas que resultan de escenarios de carga estática y por cargas variables.

Así, según sean las condiciones y entorno de operación del componente, máquina o ensamble es necesario tomar en consideración posibles modos de falla, entre estos:

Cuadro 3. Modos de Falla por Carga Estática

Modos de Falla	Fallas Resultantes por Carga Estática				
	Resistencia	Ruptura Dúctil	Termofluencia	Reventadura	Pandeo
Definición	Deformación elástica llevada hasta el punto de plasticidad del material	Deformación plástica llevada hasta el punto de ruptura del material.	Deformación Plástica en el tiempo bajo el efecto combinado de esfuerzo/temp.	Ruptura súbita del material debido primordialmente a esfuerzos radiales y tangenciales (de costilla)	Fenómeno de Inestabilidad Elástica en elementos Comprimidos Esbeltos. Fallo súbito.

FUENTE: Elaboración Technomeca S.A.

Cuadro 4. Modos de Falla por Carga Variable

Modos de Falla	Fallas Resultantes por Carga Variable		
	Fatiga Bajo Ciclaje	Fatiga Alto Ciclaje	Mecánica de la Fractura
Definición	Falla por cargas dinámicas <100,000ciclos Esfuerzo pico>SY Fenómeno dominado por deformación unitaria plástica	Falla por cargas dinámicas. Problemas de vibraciones >100,000 ciclos Fenómeno dominado por esfuerzo elástico	Se ocupa del estudio de la propagación de grietas o de defectos del material partir de su aparición o formación. Permite mejorar procesos de fabricación e inspección.

FUENTE: Elaboración Technomeca S.A.

4. Generalidades del Método de Elementos Finitos

Este proyecto final de graduación limita su objeto de acción al tema del análisis de integridad estructural por medio del método del elemento finito, esto debido a varios factores:

- Este método hace uso de herramientas tecnológicas de última generación.
- Los servicios ofrecidos en el mercado nacional que utilizan este método son escasos además de ser altamente rentables.
- Permite realizar valoraciones virtuales de fenómenos físicos por medio de modelos matemáticos antes de realizar cualquier prototipo manufacturado, lo que permite ahorrar mucho dinero, esfuerzo y tiempo, disminuir riesgos y posibilidades de falla en etapas de prueba, y un mejor entendimiento de los fenómenos involucrados y el comportamiento de los diseños en determinados entornos.

El estudio de diferentes sistemas o problemas de ingeniería requieren que los mismos sean idealizados de forma tal que pueda realizarse un análisis con relativa facilidad o por lo menos agilizando el método de cálculo.

El método del elemento finito consiste en la discretización de un sistema continuo, en elementos pequeños de geometrías conocidas a los que se denota como elementos finitos; a fin de formular las ecuaciones que rigen el equilibrio del sistema discretizado así como la solución de dichas ecuaciones de equilibrio y la interpretación de los resultados obtenidos.

El análisis de elementos finitos es un estudio de sistemas continuos “discretizados” para simplificar su estudio y cálculo. En la siguiente figura se puede apreciar una representación gráfica de un sistema continuo versus un sistema discreto del mismo. El discreto toma puntos clave del continuo para poder realizar cálculos aproximados a manera de simplificar las ecuaciones y las operaciones realizadas. La forma de tomar los diferentes puntos a ser incluidos en el análisis depende de sus requerimientos, de la exactitud, de la precisión y del tiempo disponible para realizarlo.

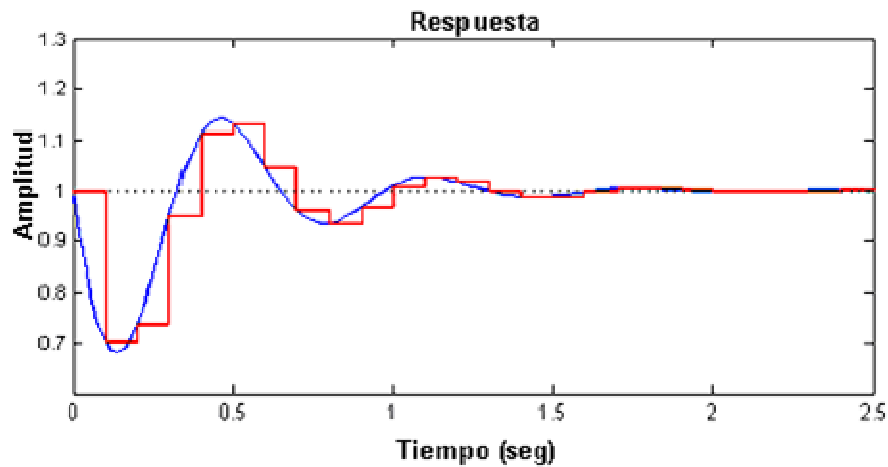


Figura 2. Ejemplo de continuo vs. Discreto

FUENTE: MathWorks

El análisis de sistemas discretos requiere de los siguientes pasos básicos para llegar a una solución satisfactoria:

- Idealización del sistema: el sistema continuo es idealizado como un discreto, formado por un ensamble finito de elementos de geometrías simples que se utilizarán posteriormente en el análisis.
- Equilibrio de los elementos: los requerimientos de equilibrio de cada uno de los elementos se establecen en términos de variables de estado para cada uno de ellos.
- Ensamble de los elementos: los requerimientos de interconexión existente entre los elementos del modelo, establecen una serie de ecuaciones simultáneas para el número de variables de estado desconocidas.
- Respuesta: las ecuaciones se resuelven simultáneamente para cada una de las variables de estado y, utilizando los requerimientos de equilibrio de los elementos, la solución de cada uno de los elementos puede ser calculada satisfactoriamente (ANSYS Help).

Estos pasos pueden ser empleados para resolver múltiples casos como problemas de estado estacionario, problemas de propagación o problemas de frecuencias naturales de oscilación. Seguirlos ayuda a llegar a una solución satisfactoria de una forma ordenada y metódica. Cabe destacar que no necesariamente todos los problemas pueden ser analizados por cálculos discretos de elementos finitos, sin embargo es una forma muy utilizada y el campo de aplicación es sumamente amplio dentro de la ingeniería. Es un método numérico de cálculo bastante poderoso en la solución de problemas, pero no debe ser considerado como la única forma de llegar a obtener resultados satisfactorios.

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo consiste en las consideraciones hechas para esta investigación; desde la definición del tipo de investigación a utilizar y la estrategia a seguir, así como las fuentes y técnicas para la adquisición de la información y datos necesarios para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto final de graduación a través de su estudio, análisis y aplicabilidad.

A. Tipo de Investigación

El tipo de investigación será descriptiva, correlacional y aplicada.

Este trabajo se compone de tres etapas macro en el proceso de investigación; en primera instancia será descriptiva según el enfoque de Hernández Sampieri en su libro metodología de la investigación, dado que busca describir situaciones, eventos, componentes y cómo se manifiestan los esfuerzos para el estudio de casos análisis de la integridad estructural y sus características particulares. (Hernández, 1997, p.71)

En una segunda etapa, tomar esta caracterización y contextualizar este tipo de esfuerzos dentro de las buenas prácticas en la administración de proyectos, lo cual consiste de un estudio correlacional.

Finalmente, para satisfacer los objetivos de este proyecto final de graduación y traducir las dos primeras etapas de este proceso investigativo en crear procedimientos, herramientas y otros insumos de trabajo, se utilizará un tipo de investigación aplicada.

B. Fuentes y Sujetos de Información

1. Fuentes de Información

Las fuentes primarias para este trabajo final de graduación son:

- Literatura de Referencia en administración de proyectos
- Entrevistas
- Grupos de opinión

Las fuentes secundarias son:

- Apuntes de clase de la maestría en gerencia de proyectos del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Datos históricos de proyectos de análisis de integridad estructural
- Otros proyectos finales de graduación para optar por el grado de máster en gerencia de proyectos en el Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Página web del Technomeca

Las fuentes de información son todos aquellos recursos de los cuales contienen datos formales, informales, escritos, orales, multimedia, entre otros.

Existen diversas clasificaciones para las fuentes de información según diferentes autores como Dankhe (1986) y Méndez (1997) por citar algunos.

Según Dankhe (1986) distingue tres tipos básicos de fuentes de información para llevar a cabo la revisión de la literatura, las fuentes primarias o directas, secundarias que reprocesan información de primera mano y terciarias de compendios de nombres y títulos.

En general se dirá que las fuentes primarias son información de primera mano, contienen información original, que no ha sido filtrada o interpretada por terceros, mientras que las fuentes secundarias han realizado un trabajo de interpretación o

síntesis en base a las fuentes primarias; y finalmente, las fuentes terciarias hacen referencia de las fuentes secundarias en guías, compendios y listas en general.

2. Los sujetos de información

En la realización de este trabajo se recurrió a la colaboración de expertos involucrados en los temas de análisis estructural y a profesionales en los temas de la administración de proyectos, para la recolección de datos, caracterización, criterios, juicio experto, requisitos, entre otros:

- Ingeniero analista estructural y diseñador.
 - Lic. Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica.
 - Especialista en Turbinas de Gas.
 - Profesor de Ingeniería Asistida por Computadora, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica.
- Ingeniero de Proyectos Dinámicos de la empresa Technomeca.
 - Bach. Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica.
 - Bach. Ingeniería Electromecánica, Universidad Fidélitas.
 - Máster en Ingeniería Mecánica con énfasis en Sistemas Térmicos y de Energía, Universidad de Costa Rica.
 - Diseñador Electromecánico, Análisis Dinámico y Vibraciones.
- Ingeniero de Proyectos Mecánicos y Térmicos de la empresa Technomeca.
 - Lic. Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica.
 - Máster en Administración de la Energía, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
 - Diseñador Mecánico, Analista Estructural, Análisis No-Lineal y Transferencia de Calor.
- Gerente General de la empresa GQMPS.
 - Lic. Ingeniería Mecánica, UCR.
 - Máster en Ciencias de Ingeniería Mecánica, Carnegie Mellon University.

- Métodos de Elemento Finito, Simulación, Elasticidad no lineal, Hiperelasticidad, Invención, Propiedad Intelectual, Diseño.
- Director Académico de la empresa H&C Solutions.
 - Director de este proyecto final de graduación.

C. Técnicas de Investigación

Las técnicas de investigación utilizadas en este proyecto final de graduación son la consulta de la documentación, la entrevista y un grupo de opinión.

1. Consulta de la documentación de referencia y bibliografía

Se comprende según Barrantes cómo “la primera etapa que consiste en detectar, obtener y consultar bibliografías y otros materiales que puedan ser útiles para el propósito del estudio, así como extraer y recopilar la información relevante que atañe el problema. Esta revisión puede ser selectiva, puesto que es importante recordar que la expansión de la información es un fenómeno diario” (Barrantes, 2002, p. 127).

Se consultaron diversas fuentes, tal cómo, trabajos finales de graduación para optar por el grado de máster en gerencia de proyectos del Instituto Tecnológico de Costa Rica y libros en el tema de la administración de proyectos. La consulta permitió identificar técnicas y herramientas que facilitaron la construcción de esta propuesta de mejora.

2. Entrevista

La técnica de entrevista es: “la comunicación interpersonal establecida entre el investigador y los sujetos de estudio a fin de obtener respuestas verbales a las interrogantes planteadas en el problema propuesto” (Canales, Alvarado y Pineda, 1986, p. 37).

Una entrevista semi-estructurada de tipo personal ha sido realizada a los sujetos de información mencionados en el punto anterior relacionados con proyectos de análisis

de integridad estructural y con el método del elemento finito. El tema central de dicha entrevista es:

- “Descripción de un ciclo de vida típico de un proyecto de análisis de integridad estructural por el método del elemento finito.”

3. Grupo de Opinión

Estos reúnen a los interesados y expertos en la materia, preseleccionados para conocer acerca de sus expectativas y actitudes con respecto a un producto, servicio o resultado propuesto. Un moderador capacitado guía al grupo a través de una discusión interactiva diseñada para ser más conversacional que una entrevista individual. (PMBOK®, p. 107)

El grupo de opinión se llevó a cabo con los ingenieros de la empresa Soluciones de Ingeniería Technomeca, para abordar los siguientes temas:

- “Definición de una lista de actividades estándar”.
- “Creación de un diagrama de red para un proyecto genérico de análisis de integridad estructural”.
- “Identificación y cualificación de los factores de incertidumbre en la estimación de tiempo”.
- “Identificación y cualificación de los factores de incertidumbre en la definición del alcance”.
- “Identificación y cualificación de los aspectos que intervienen en el riesgo de la No Convergencia”.

D. Procesamiento y Análisis de Datos

El procesamiento y análisis de los datos de este proyecto final de graduación se describe a continuación:

- Mediante la técnica de la entrevista se obtuvo una descripción detallada y cualitativa sobre los aspectos que comprende un proyecto genérico de análisis de integridad estructural y se documentó dicha entrevista mediante un procesador de texto.
- Alrededor de la información recabada mediante las entrevistas se realizó un grupo de opinión con los consultores de la empresa Technomeca para transformar la información verbal documentada en información puntual sobre actividades, para lo que se creó una lista de actividades.
- Con la lista y cómo una segunda parte del trabajo realizado por el grupo de opinión se procedió a crear un diagrama de red del proyecto genérico utilizando las herramientas de Microsoft Office 2007.
- Para la identificación y cuantificación de los factores de incertidumbre en la estimación de tiempo, se creó un factor compuesto por:
 - La incertidumbre en estimar el tiempo de cada actividad
 - La probabilidad de iterar en cada actividad

Se ha expandido la discusión sobre la decisión en la selección de estos factores en el capítulo cuatro en la sección de [análisis de la situación actual](#).

Esta cuantificación mediante hojas de cálculo se realizó utilizando escalas relativas, cómo se muestra a continuación:

Cuadro 5. Escala relativa para cuantificación de la incertidumbre en las estimaciones de tiempo.

Incertidumbre	Probabilidad	Efecto	
0,05	0,1	Muy Bajo	
0,10	0,3	Bajo	
0,20	0,5	Medio	
0,40	0,7	Alto	
0,80	0,9	Muy Alto	

Fuente: Elaboración propia

- Para la identificación y cuantificación de los factores de incertidumbre en la definición del alcance, se creó un factor compuesto por:
 - El impacto de que se produzca un cambio en el alcance debido a la incertidumbre sobre el resultado de cada actividad
 - La probabilidad de que en cada actividad pueda surgir la necesidad de cambiar el alcance.

Esta cuantificación tanto para el factor de incertidumbre en la definición del alcance cómo para la identificación del riesgo de No-Convergencia se realizó mediante hojas de cálculo y utilizando la siguiente escala que se muestra a continuación:

Cuadro 6. Escala relativa para cuantificación de la incertidumbre en la definición del alcance e identificación del riesgo.

Impacto	Probabilidad	Efecto	
0,05	0,1	Muy Bajo	
0,10	0,3	Bajo	
0,20	0,5	Medio	
0,40	0,7	Alto	
0,80	0,9	Muy Alto	

- **Fuente: Elaboración propia**

Los resultados de este análisis de los resultados son finalmente procesados y documentados en la memoria de este proyecto final de graduación, mostrando en forma ordenada y pertinente los aspectos desarrollados durante el proceso de investigación.

CAPÍTULO IV. PROPUESTA

E. Análisis de Situación Actual

El análisis de la situación actual se realizó en primera instancia, recabando datos mediante la técnica de la entrevista y seguidamente su interpretación y manejo de datos se realizó mediante grupos de opinión con los consultores de Technomeca, a continuación se presentan los resultados:

1. La entrevista

La entrevista de tipo personal, semi-estructurada, se llevó a cabo con los ingenieros de la empresa TechnoMeca; el detalle y documentación de dichas entrevistas se encuentran en el [apéndice](#) uno de este trabajo final de graduación.

2. Grupo de Opinión

El grupo de opinión se llevó a cabo con los ingenieros de la empresa Soluciones de Ingeniería Technomeca, y aquí se muestran los resultados para cada uno de los temas abordados:

- Definición de una lista de actividades estándar

A partir de las entrevistas y el juicio experto de los actores que participaron del grupo de opinión se logró realizar una lista o plantilla de actividades puntuales estándar que comprende un proyecto típico de análisis de integridad estructural la cual se muestra en detalle en el [apéndice](#) dos de este proyecto final de graduación.

El siguiente cuadro presenta un resumen de esta lista de actividades de un proyecto genérico de análisis de integridad estructural:

Cuadro 7. Resumen, lista de actividades de proyecto AIE

Actividad	Título	Descripción
0	Iniciación	
1	Problema / Necesidad	Entendimiento y discusión del problema y/o necesidad
2	Criterios	Definición de los criterios de aceptación
3	Puntos Críticos	Posibles modos de falla asociados, identificación de puntos críticos del diseño
4	Hardware	Definición del volumen de control y componentes a incluir
5	Tipos de Análisis	Definición de los tipos de análisis a realizar
6	Enfoque	Condiciones de modelado
7	CAD	Confección de los modelos CAD
8	Geometría FEM	Traducción de los modelos CAD a un ambiente FEA y limpieza
9	Propiedades Materiales	Caracterización de los materiales involucrados
10	Solución Analítica	Validación mediante cálculos manuales
11	Malla	Discretización del modelo continuo
12	Condiciones de Frontera	Restricciones
13	Condiciones de Carga	Simulación del entorno de carga
14	Calidad (Problema)	Aseguramiento de la calidad en la definición del problema y del enfoque de solución
15	Solución	Formulación, opciones y convergencia del modelo matemático
16	Post-Procesamiento	Obtención de Resultados
17	Calidad (Resultados)	Aseguramiento de la calidad de los resultados a ser entregados
18	Interpretación	Análisis e interpretación de resultados
19	Reporte Técnico	
20	Final	

Fuente: Elaboración propia con base en el cuadro veintidós del apéndice dos.

Esta lista de actividades realizada a partir de los datos recabados durante las entrevistas, es información que queda cómo insumo para la empresa Technomeca en forma explícita y puntual; dado que actualmente no se cuenta con este recurso y la definición de actividades a la hora de realizar la definición del alcance y las estimaciones de tiempo es de forma más escueta, algunas actividades son asumidas cómo implícitas u obvias, y no hay consistencia en la definición de las actividades entre los diferentes proyectos.

- “Creación de un diagrama de red para un proyecto genérico de análisis de integridad estructural”.

A partir de la lista de actividades generada en el punto anterior, el grupo de opinión procedió a secuenciar las actividades y sus respectivas interrelaciones. Claro está que dichas interrelaciones son función de los recursos disponibles; para la dinámica del grupo de opinión se ha partido del supuesto de que se cuenta con recursos ilimitados y se ha construido la red “hacia atrás” o de fin, a principio; esto se ha decidido así para no incurrir en asignar dependencias discrecionales innecesarias entre actividades, sólo las obligatorias.

El diagrama de red resultante se muestra en la figura tres a continuación:

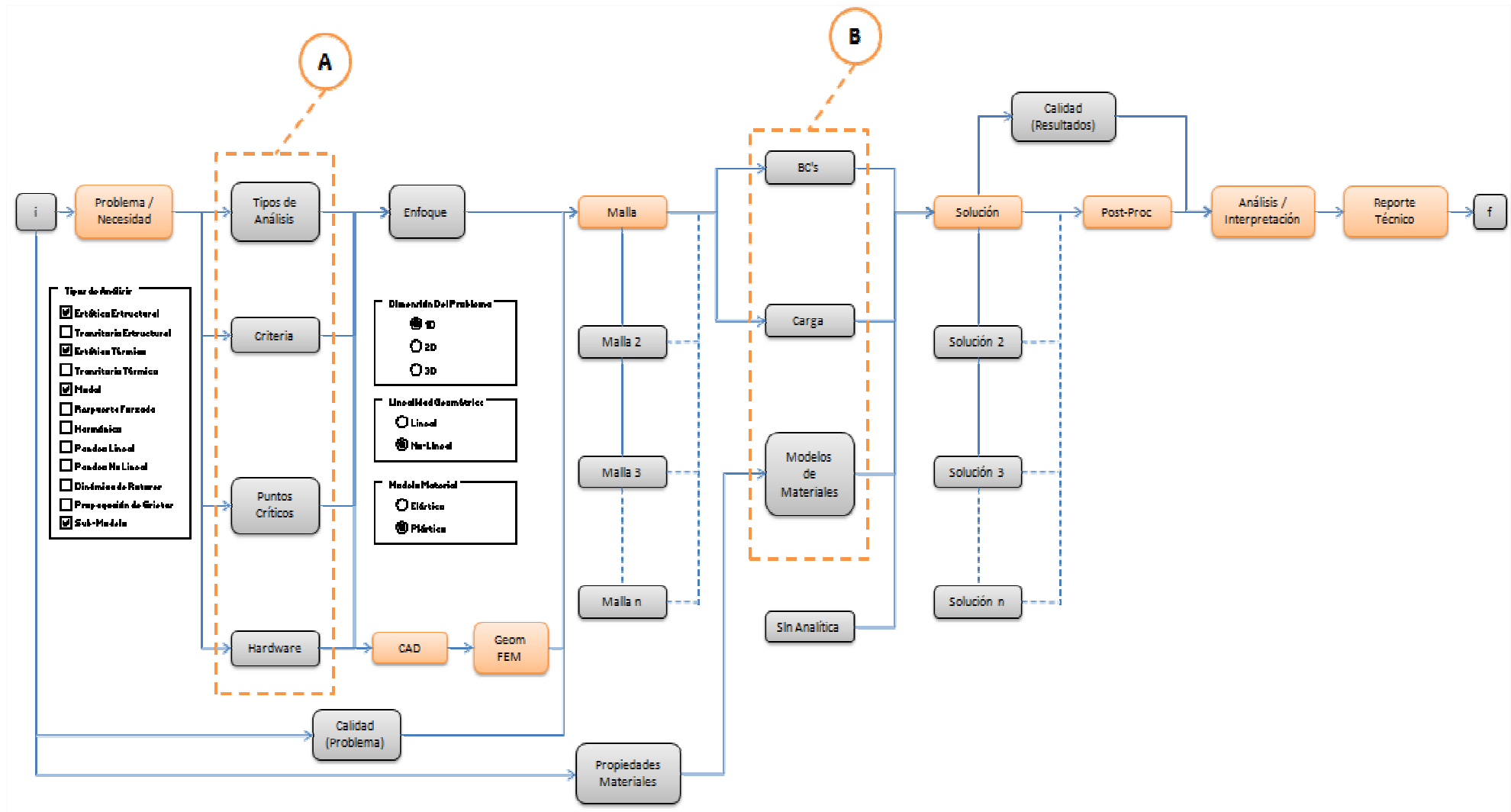


Figura 3. Diagrama de red de un proyecto típico de AIE por el MEF

Fuente: Elaboración propia con base en la discusión del grupo de opinión con los consultores de Technomeca.

- “Identificación y cualificación de los factores de incertidumbre en la estimación de tiempo”.

Las siguientes se han identificado cómo actividades de alta variabilidad e incertidumbre para la estimación inicial de tiempos: Malla, Propiedades de Materiales y Solución. El detalle del análisis realizado puede observarse en el cuadro ocho de este trabajo final de graduación.

- Malla:

- La incertidumbre en estimar el tiempo de la actividad se considera alta. En mallas complejas, se debe de balancear varios aspectos y es difícil no comprometer alguno de éstos varios aspectos críticos en este proceso. Por ejemplo, es importante lograr una densidad de malla adecuada para la resolución de los resultados pero esto implica un aumento significativo en el tiempo de solución; o por el contrario, con tal de bajar la densidad de la malla hay que fragmentar significativamente las geometrías lo cual consume bastante tiempo; esto es tomado en cuenta mediante este primer factor de incertidumbre.
- La probabilidad de iterar en esta actividad se considera como media. Este segundo factor de incertidumbre toma en cuenta otro aspecto frecuente en este tipo de proyectos, la necesidad de iterar; por ejemplo, algunas zonas dentro de la malla podrían considerarse muy rígidas y potencialmente se comportarían de manera inadecuada ante la flexión, es necesario iterar a fin de eliminar estas zonas dentro de la malla.

- Propiedades de materiales:

- La incertidumbre en estimar el tiempo de esta actividad se considera muy alta. En este caso, es bastante complejo estimar el tiempo que toma la creación de los modelos de materiales;

esto debido a que la información a recolectar depende en buena medida de resultados posteriores; pero sobre todo el tema más complejo es la poca disponibilidad de la información y en ocasiones es necesario realizar estimaciones.

- La probabilidad de iterar en esta actividad se considera muy baja. La necesidad de iterar es poco probable, una vez que ya se ha obtenido la información y se hayan creado los modelos de materiales, es difícil que haya que volver atrás.

- Solución

- La incertidumbre en estimar el tiempo de esta actividad se considera alta. Es difícil estimar el tiempo de solución dado que este depende de múltiples factores como los grados de libertad, la linealidad de la solución, la formulación de contactos, los tipos de opciones que se pueden escoger para la formulación del modelo matemático, entre otras.
- La probabilidad de iterar en esta actividad se considera alta. Esto dado que típicamente se conduce con rutinas macro y es necesario hacer varias corridas de prueba para asegurarse que todo está correctamente aplicado y que las opciones seleccionadas son óptimas para la solución.

Cuadro 8. Identificación y cuantificación de los factores de incertidumbre en la estimación de tiempo.

Actividad	Título	Descripción	Factor de Incertidumbre en la Estimación del Tiempo		
			Estimación en la actividad	Probabilidad de Iterar	Factor Resultante
0	Iniciación				
1	Problema / Necesidad	Entendimiento y discusión del problema y/o necesidad	0,050	0,100	● 0,005
2	Criteria	Definición de los criterios de aceptación	0,100	0,100	● 0,010
3	Puntos Críticos	Posibles modos de falla asociados, identificación de puntos críticos del diseño	0,050	0,100	● 0,005
4	Hardware	Definición del volumen de control y componentes a incluir	0,050	0,100	● 0,005
5	Tipos de Análisis	Definición de los tipos de análisis a realizar	0,050	0,100	● 0,005
6	Enfoque	Condiciones de modelado	0,100	0,500	● 0,050
7	CAD	Confección de los modelos CAD	0,100	0,100	● 0,010
8	Geometría FEM	Traducción de los modelos CAD a un ambiente FEA y limpieza	0,200	0,100	● 0,020
9	Propiedades Materiales	Caracterización de los materiales involucrados	0,800	0,100	● 0,080
10	SIn Analítica	Validación mediante cálculos manuales	0,300	0,100	● 0,030
11	Malla	Discretización del modelo continuo	0,400	0,500	● 0,200
12	Condiciones de Frontera		0,200	0,500	● 0,100
13	Condiciones de Carga		0,100	0,100	● 0,010
14	Calidad (Problema)	Aseguramiento de la calidad en la definición del problema y del enfoque de solución	0,050	0,100	● 0,005
15	Solución	Formulación, opciones y convergencia del modelo matemático	0,400	0,700	● 0,280
16	Post-Procesamiento		0,100	0,300	● 0,030
17	Calidad (Resultados)	Aseguramiento de la calidad de los resultados a ser entregados	0,050	0,100	● 0,005
18	Análisis / Interpretación	Análisis e interpretación de resultados	0,100	0,500	● 0,050
19	Reporte Técnico		0,050	0,100	● 0,005
20	Final				

Fuente: Elaboración propia con base en la discusión del grupo de opinión con los consultores de Technomeca.

- “Identificación y cuantificación de los factores de incertidumbre en la definición del alcance”.















Las siguientes se han identificado cómo actividades de alta variabilidad e incertidumbre para la definición de la línea base del alcance: La definición del problema y necesidad; criterios de aceptación; definición preliminar sobre los puntos críticos, enfoque y el análisis e interpretación de los resultados. El detalle del análisis realizado puede observarse en el cuadro nueve de este trabajo final de graduación.

- Definición del problema y necesidad
 - Se considera de probabilidad baja e impacto muy alto en la introducción de cambios a la línea base del alcance. Usualmente se realiza un buen levantamiento de requisitos y discusiones exhaustivas para entender bien el problema, por lo que la probabilidad de que esto cambie es baja; y cómo en todo proyecto, si la necesidad cambiara el impacto sería muy alto pues podría cambiar todas las consideraciones hechas para estudiar y resolver la necesidad.
- Definición de los criterios técnicos de aceptación
 - Se considera de probabilidad media e impacto muy alto en la introducción de cambios a la línea base del alcance. Este punto se considera crucial pues típicamente esto es definición del cliente y es muy diferente validar para diez mil ciclos de operación que para trescientos mil ciclos de operación o para vida infinita, por citar un ejemplo. Por eso el cliente debe entender muy bien aquí cuáles son sus verdaderos criterios de aceptación.
- Enfoque y definición preliminar de puntos críticos
 - Se considera de probabilidad baja e impacto muy alto en la introducción de cambios a la línea base del alcance. Aquí se define la dimensión del problema, la linealidad geométrica, los

modelos de materiales a utilizar y en función de estas consideraciones es posible observar y entender algunos de los fenómenos físicos esperados o por el contrario no poder hacerlo. La experiencia de los analistas resulta crítica aquí a la hora de definir el enfoque y se considera que la necesidad de cambiar este enfoque es baja, pero en caso de ser así podría implicar un alto re-trabajo. Un ejemplo de esto podría ser el estudio de las fugas en una carcasa bridada, hay diferentes formas de poder hacerlo, sin embargo si no se incluyen contactos y una adecuada definición de sus opciones, pernos y precargas, difícilmente se pueda estudiar este problema.

- Análisis e interpretación de resultados
 - Se considera de probabilidad media e impacto muy alto en la introducción de cambios a la línea base del alcance. En este punto se cotejan los criterios de aceptación con los resultados obtenidos tras la realización del análisis; cómo se puede observar en las entrevistas realizadas, aquí en este punto pueden darse múltiples escenarios cómo aceptar el diseño, rechazarlo, re-diseñarlo, re-analizarlo, entre otros. A manera de ejemplo, en un estudio esperando encontrar problemas esencialmente por Termofluencia, es posible encontrar fluencia en un punto crítico del diseño y requerir ahora una evaluación de la mecánica de fractura e incorporación de propiedades plásticas de material.

Cuadro 9. Identificación y cuantificación de los factores de incertidumbre en la definición del alcance.

Actividad	Título	Descripción	Factor de Incertidumbre en la estimación del alcance		
			Probabilidad	Impacto	Factor Resultante
0	Iniciación				
1	Problema / Necesidad	Entendimiento y discusión del problema y/o necesidad	0,300	0,800	 0,240
2	Criteria	Definición de los criterios de aceptación	0,500	0,800	 0,400
3	Puntos Críticos	Posibles modos de falla asociados, identificación de puntos críticos del diseño	0,500	0,800	 0,400
4	Hardware	Definición del volumen de control y componentes a incluir	0,100	0,400	 0,040
5	Tipos de Análisis	Definición de los tipos de análisis a realizar	0,100	0,200	 0,020
6	Enfoque	Condiciones de modelado	0,300	0,800	 0,240
7	CAD	Confección de los modelos CAD	0,100	0,100	 0,010
8	Geometría FEM	Traducción de los modelos CAD a un ambiente FEA y limpieza	0,100	0,100	 0,010
9	Propiedades Materiales	Caracterización de los materiales involucrados	0,300	0,400	 0,120
10	SIn Analítica	Validación mediante cálculos manuales	0,100	0,100	 0,010
11	Malla	Discretización del modelo continuo	0,100	0,200	 0,020
12	Condiciones de Frontera		0,200	0,200	 0,040
13	Condiciones de Carga		0,200	0,200	 0,040
14	Calidad (Problema)	Aseguramiento de la calidad en la definición del problema y del enfoque de solución	0,100	0,200	 0,020
15	Solución	Formulación, opciones y convergencia del modelo matemático	0,200	0,200	 0,040
16	Post-Procesamiento		0,100	0,200	 0,020
17	Calidad (Resultados)	Aseguramiento de la calidad de los resultados a ser entregados	0,100	0,200	 0,020
18	Análisis / Interpretación	Análisis e interpretación de resultados	0,500	0,800	 0,400
19	Reporte Técnico		0,100	0,100	 0,010
20	Final				

Fuente: Elaboración propia con base en la discusión del grupo de opinión con los consultores de Technomeca.

- “Identificación y cuantificación de los aspectos que intervienen en el riesgo de la No Convergencia”.

Las siguientes se han identificado cómo actividades de riesgo de no convergencia: tipos de análisis, enfoque y solución. El detalle del análisis realizado puede observarse en el cuadro diez de este trabajo final de graduación.





















El grupo de opinión ha identificado puntualmente que dentro de estas actividades, hay factores que aumentan significativamente la complejidad del modelo y por tanto aumentan la probabilidad de no tener convergencia de la solución. El detalle es de un corte altamente técnico que escapa al área de interés de este trabajo final de graduación, pero básicamente tiene que ver con la formulación matemática del fenómeno físico y cómo se incrementa significativamente la complejidad de los sistemas de ecuaciones.

Es síntesis, los siguientes aspectos incrementan significativamente la probabilidad de no tener un modelo matemático con una solución convergente:

- Análisis no lineales
- Modelos plásticos de materiales
- Alto número de grados de libertad problema
- Precargas
- Elementos de contacto
- Opciones de solución

En la medida de lo posible, es mejor evitar estos factores de riesgo si las condiciones para realizar el análisis así lo permiten. En los escenarios donde sea necesario incluir estos aspectos debe hacerse una adecuada gestión de este riesgo de no obtener convergencia de la solución.






Cuadro 10. Identificación y cuantificación de los aspectos que intervienen en el riesgo de la no convergencia.

			Identificación Riesgo (No Convergencia)		
Actividad	Título	Descripción	Probabilidad	Impacto	Factor Resultante
0	Iniciación				
...					
5	Tipos de Análisis	Definición de los tipos de análisis a realizar	Según Tipo		
	5.1	Estático	0,300	0,200	 0,060
	5.2	Transitorio	0,500	0,800	 0,400
	5.3	Modal	0,100	0,200	 0,020
	5.4	Respuesta Forzada	0,300	0,200	 0,060
	5.5	Harmónico	N/A	N/A	N/A
	5.6	Térmico	0,100	0,100	 0,010
	5.7	Pandeo Lineal	0,300	0,200	 0,060
	5.8	Pandeo No-Lineal	0,500	0,400	 0,200
	5.9	Dinámica de Rotores	0,100	0,200	 0,020
	5.10	Mecánica de fractura	N/A	N/A	N/A
	5.11	Propagación de grietas	N/A	N/A	N/A
	5.12	Sub-modelos	0,100	0,100	 0,010
	5.13	...			
6	Enfoque	Condiciones de modelado	Según Condición		
	6.1	Dimensión del problema (1D, 2D, 3D)	0,100	0,200	 0,020
	6.2	Lineal (Deflexiones)	0,100	0,200	 0,020
	6.3	No-Lineal (Deflexiones)	0,500	0,400	 0,200
	6.4	Elasticidad (Modelo Material)	0,100	0,200	 0,020
	6.5	Plasticidad (Modelo Material)	0,500	0,400	 0,200
	6.6	Precargas	0,300	0,200	 0,060
	6.7	Condiciones de frontera	0,500	0,200	 0,100
	6.8	Elementos de Contacto	0,700	0,800	 0,560
	6.9	Condiciones de carga	0,100	0,200	 0,020
	6.10	Simplificaciones	N/A	N/A	N/A
	6.11	Asunciones	N/A	N/A	N/A
	6.12	Limitaciones	N/A	N/A	N/A
	6.13	Tipos de elementos	0,100	0,200	 0,020
	6.14	...			
...					
15	Solución	Formulación, opciones y convergencia del modelo matemático			
	15.1	Opciones de solución	0,700	0,800	 0,560
	15.2	Tiempo de solución del modelado matemático			
	15.3	Convergencia			
...					
20	Final				

Fuente: Elaboración propia con base en la discusión del grupo de opinión con los consultores de Technomeca.

En la figura cuatro se ha actualizado el diagrama de red para un proyecto típico de análisis de integridad estructural, la siguiente simbología ha sido utilizada en los diagramas de red presentados en las figuras tres y cinco de este trabajo final de graduación, para identificar de forma gráfica las actividades que introducen mayor variabilidad e incertidumbre en la estimación inicial de tiempo, en la definición del alcance y en el riesgo de la no convergencia.

Figura 4. Simbología utilizada en diagramas de red

<u>Simbología</u>	
	Actividad esperable dentro de la Ruta Crítica 
	Actividad que puede introducir variaciones considerables en las estimaciones de tiempo
	Actividad que puede introducir variaciones considerables a la línea base del alcance
	Actividad de Alto Riesgo de No Convergencia

Fuente: Elaboración propia

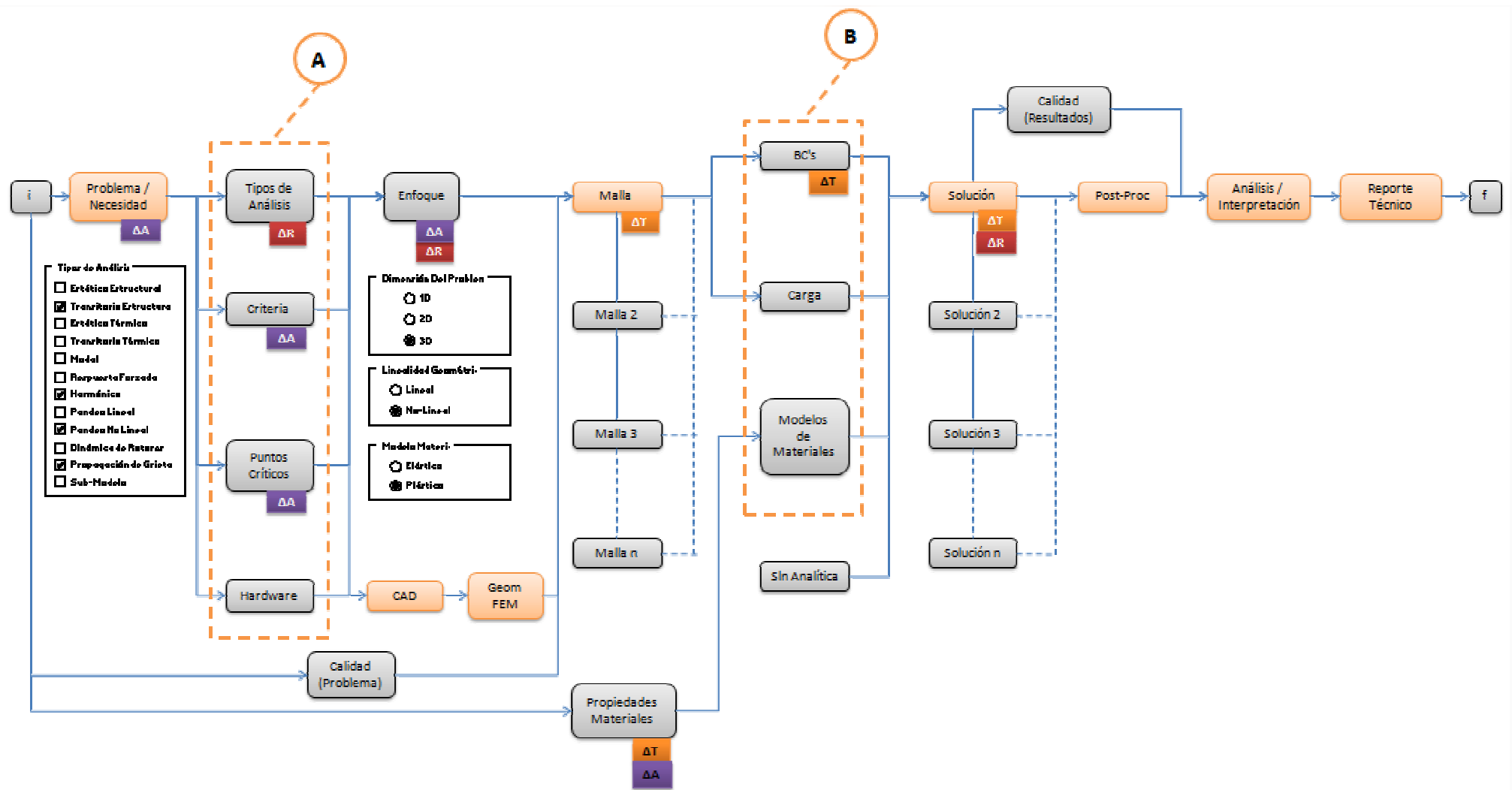


Figura 5. Diagrama de Red de un proyecto típico AIE por el MEF con factores de incertidumbre para estimación de tiempo, definición del alcance e identificación de elementos de riesgo.

Fuente: Elaboración propia con base en la discusión del grupo de opinión con los consultores de Technomeca.

F. Propuesta de Solución

Después de la realización de un diagnóstico de la situación actual y haber identificado los factores que más introducen variabilidad e incertidumbre en las estimaciones iniciales de tiempo y definición del alcance, se ofrece ahora una propuesta de mejora.

Esta propuesta de mejora está orientada en aspectos que fundamentalmente le permitan a la organización realizar estimaciones más realistas.

Puntualmente, estos son los aspectos que comprenden la propuesta de mejora:

- Proceso de definición del alcance
- Modelo probabilístico para la estimación de tiempos
- Proceso para el control de cambios
- Proceso para la gestión de los riesgos

Es importante resaltar aquí que todos los documentos, plantillas, mapas de procesos, cuadros entre otros, pretenden ser documentos vivos para Technomeca, por lo que todas las versiones impresas se consideran obsoletas y se mantendrán siempre en formato digital, con una numeración, codificación y control de versiones.

Los códigos utilizados para la identificación de los documentos de los procesos se muestran a continuación cuadro once de este proyecto final de graduación.

Cuadro 11. Códigos de los documentos de los procesos

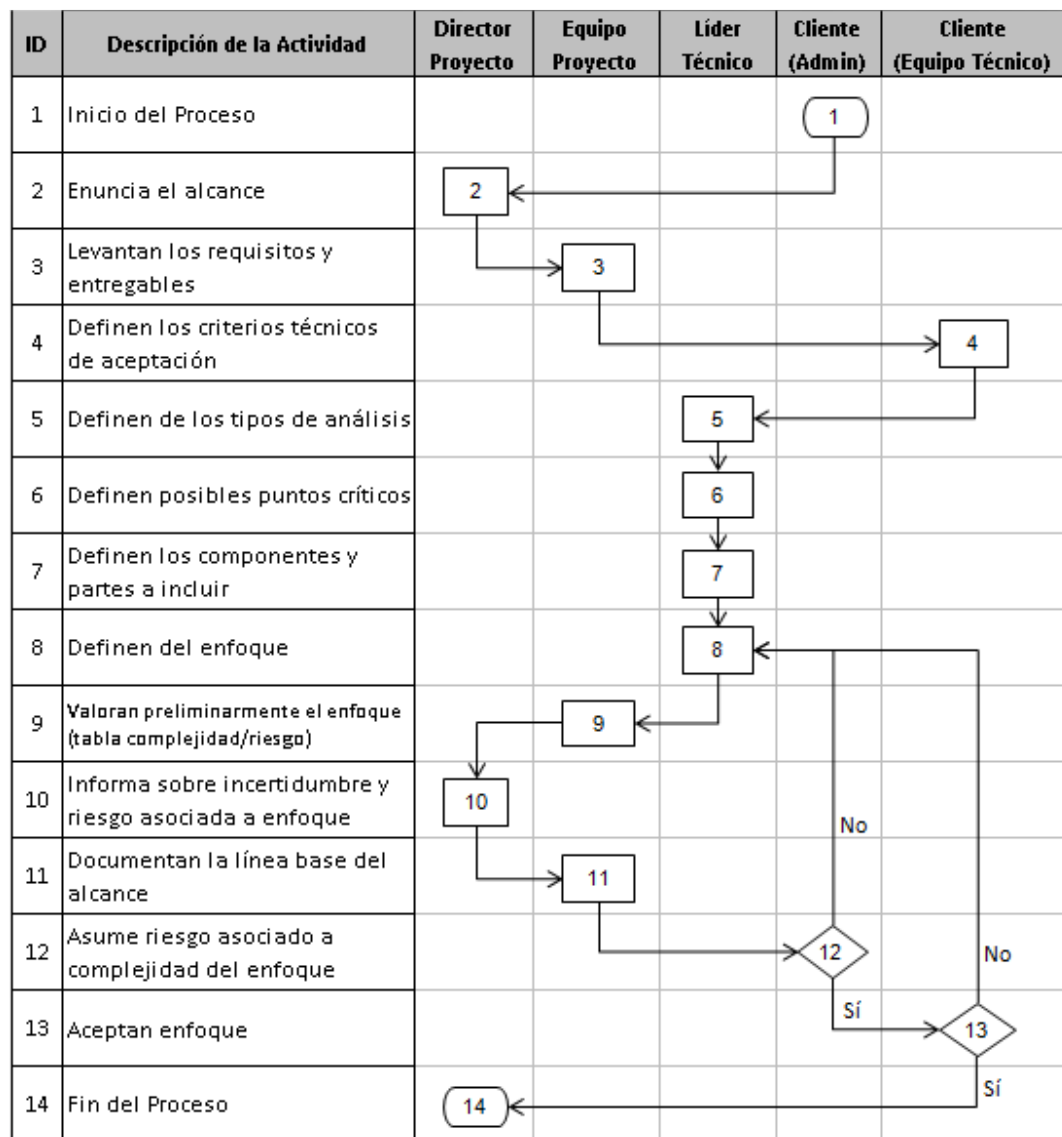
Proceso	Documentos Asociados al Proceso	Código
Definición del Alcance	Mapa del proceso para la definición del alcance	DA-2.001_rev1
	Tabla de complejidad vs riesgo de no convergencia según tipos de análisis y enfoque	DA-2.002_rev1
Estimación de Tiempo	Mapa del Proceso para la estimación del tiempo por medio de un modelo probabilístico	MPT-3.001_rev1
	Modelo Probabilístico para la estimación de Tiempos	MPT-3.002_rev1
	Red de proyecto genérico de AIE	MPT-3.003_rev1
Identificación y Respuesta a los Riesgos	Mapa del Proceso de Identificación y Respuesta a los Riesgos	PR-8.001_rev1
	Código de Categorías de Riesgo	PR-8.002_rev1
	Matriz de Riesgos	PR-8.003_rev1
	Reporte por Materialización de Riesgos	PR-8.004_rev1
Control de Cambios	Mapa del Proceso para el control de cambios	PCC-2.001_rev1
	Plantilla para la Solicitud de Cambios	PCC-2.002_rev1

Fuente: Elaboración propia

1. Proceso de definición del alcance

La primera parte de esta propuesta de mejora comprende un proceso para la definición del alcance cómo se muestra en el siguiente mapa del proceso.

Cuadro 12. Mapa del Proceso para la Definición del Alcance



Fuente: Elaboración propia

Cómo se puede observar, este proceso incorpora un elemento importante para tomar en cuenta de forma preliminar, la incertidumbre asociada al nivel de complejidad definido en el enfoque para la realización de los análisis.




















Esto se ha propuesto incluyendo una “valoración preliminar del enfoque” por parte del equipo del proyecto. Para este propósito se utilizará una tabla de complejidad vs exposición al riesgo de no convergencia según los tipos de análisis y el enfoque seleccionados.

Según sea el nivel de complejidad, así será más difícil la estimación de tiempo y el aumento en el riesgo de un análisis no convergente y por tanto un potencial cambio sustancial a la línea base del alcance, cómo hemos mencionado y analizado en la primera parte de este capítulo.

Esto dicho, la intención de incorporar este tipo de información a este nivel de definición del alcance no es hacer un análisis de riesgos minucioso, ni estimaciones de tiempos; esto lo dejamos para un desarrollo detallado posterior, pero sí es la intención que el cliente reconozca desde la definición del alcance aspectos que pueden introducir variabilidad e incertidumbre en las estimaciones de tiempos y especialmente en la definición del alcance.

La tabla de exposición al riesgo de no convergencia se muestra a continuación:

Cuadro 13. Tabla de complejidad del análisis vs exposición al riesgo de no convergencia según tipo de análisis y enfoque

Tipos de Análisis	Probabilidad	Impacto	Factor Resultante
Estático	0,300	0,200	 0,060
Transitorio	0,500	0,800	 0,400
Modal	0,100	0,200	 0,020
Respuesta Forzada	0,300	0,200	 0,060
Harmónico	N/A	N/A	N/A
Térmico	0,100	0,100	 0,010
Pandeo Lineal	0,300	0,200	 0,060
Pandeo No-Lineal	0,500	0,400	 0,200
Dinámica de Rotores	0,100	0,200	 0,020
Mecánica de fractura	N/A	N/A	N/A
Propagación de grietas	N/A	N/A	N/A
Sub-modelos	0,100	0,100	 0,010
Enfoque	Probabilidad	Impacto	Factor Resultante
Dimensión del problema (1D, 2D, 3D)	0,100	0,200	 0,020
Lineal (Deflexiones)	0,100	0,200	 0,020
No-Lineal (Deflexiones)	0,500	0,400	 0,200
Elasticidad (Modelo Material)	0,100	0,200	 0,020
Plasticidad (Modelo Material)	0,500	0,400	 0,200
Precargas	0,300	0,200	 0,060
Condiciones de frontera	0,500	0,200	 0,100
Elementos de Contacto	0,700	0,800	 0,560
Condiciones de carga	0,100	0,200	 0,020
Simplificaciones	N/A	N/A	N/A
Asunciones	N/A	N/A	N/A
Limitaciones	N/A	N/A	N/A
Tipos de elementos	0,100	0,200	 0,020

Fuente: Elaboración propia con base en el trabajo realizado con del grupo de opinión

2. Modelo probabilístico para la estimación de tiempo

Algunas de las herramientas y técnicas sugeridas en el PMBOK® para estimar la duración de las actividades son el juicio experto y la estimación análoga, las cuales la organización utiliza ya; sin embargo también se sugiere cómo parte de esta propuesta de mejora la utilización de la estimación por tres valores.

A continuación se muestra el mapa del proceso para la estimación de tiempos mediante el empleo de un modelo probabilístico:

Cuadro 14. Mapa del proceso para la estimación del tiempo por medio de un modelo probabilístico.

ID	Descripción de la Actividad	Director Proyecto	Equipo de Proyecto	Líder Técnico	Equipo Técnico
1	Inicio del Proceso	1			
2	Define las actividades			2	
3	Secuencian las actividades y elaboran diagrama de red		3		
4	Estima la duración media de las actividades			4	
5	Estiman la duración optimista y pesimista de las actividades				5
6	Determinan la ruta crítica del proyecto		6		
7	Emplean modelo probabilístico, determinan duración vs confiabilidad		7		
8	Fin del Proceso	8			

Fuente: Elaboración propia

La precisión de los estimados de la duración de la actividad puede mejorarse tomando en cuenta el grado de incertidumbre y de riesgo de la estimación. (PMBOK®, 2008, p.150).

Esta propuesta de mejora para la estimación inicial de tiempos sugiere la utilización del método PERT, que define un rango aproximado de duración para cada actividad así como una duración esperada; esto permite analizar la varianza estadística y utilizar una distribución de probabilidad para analizar la confiabilidad de las estimaciones.

La nomenclatura y ecuaciones utilizadas se muestran en el [anexo](#) dos de este proyecto final de graduación.

Una herramienta de cálculo elaborada en Microsoft Excel®, es parte de los documentos que acompañan este proceso para la realización de la estimación mediante el uso del modelo probabilístico. Las salidas de dicha herramienta son:

- Tiempo esperado total
- Tiempo medio total
- Desviación estándar
- Probabilidad de terminar el proyecto en el tiempo medio total
- Tiempo requerido para terminar el proyecto con un 99.81% de confianza
- Probabilidad de terminar el proyecto en un número arbitrario de horas

A manera de referencia se muestra esta herramienta; sus entradas, salidas y datos por actividad se presentan en la siguiente figura con datos arbitrarios:

Figura 6. Herramienta para estimación de tiempos, PERT

Modelo Probabilístico para la estimación de Tiempos (MPT-3.002_rev1)

Nombre del Proyecto: Análisis Estructural Eje

Código del Proyecto: 2012.002.0001

1. Tiempo Total Esperado (hrs):	327,0
2. Tiempo Medio Total (hrs):	330,0
3. Desviación Estándar Total (hrs):	12,0

4. Probabilidad de terminar el Proyecto en el Tiempo Medio Total

60%

5. Tiempo Requerido para terminar el Proyecto con un 99.61% de confianza

361,8 hrs

6. Probabilidad de teminar el Proyecto en el siguiente número de horas

Horas	Probabilidad
1000,0	100%

Act	Título	Descripción	t_o	t_p	t_e	t_e (hrs)	Var
0	Iniciación						
1	Problema / Necesidad	Entendimiento y discusión del problema y/o necesidad	20	40	55	39,2	34,0
2	Criteria	Definición de los criterios de aceptación	30	50	60	48,3	25,0
3	Puntos Críticos	Posibles modos de falla asociados, identificación de puntos críticos del	40	60	75	59,2	34,0
-	-	-	Datos incompletos, caracter				ilustrativo
16	Post-Procesamiento	Deflecciones, esfuerzos, linearizaciones, secciones	20	30	35	29,2	6,3
17	Calidad (Resultados)	Aseguramiento de la calidad de los resultados a ser entregados	35	40	45	40,0	2,8
18	Análisis / Interpretación	Análisis e interpretación de resultados	41	50	75	52,7	32,1
19	Reporte Técnico	Presentación final, reporte detallado	46	60	65	58,5	10,0
20	Final		330			327,0	144,2

Fuente: Elaboración propia basado en el método PERT

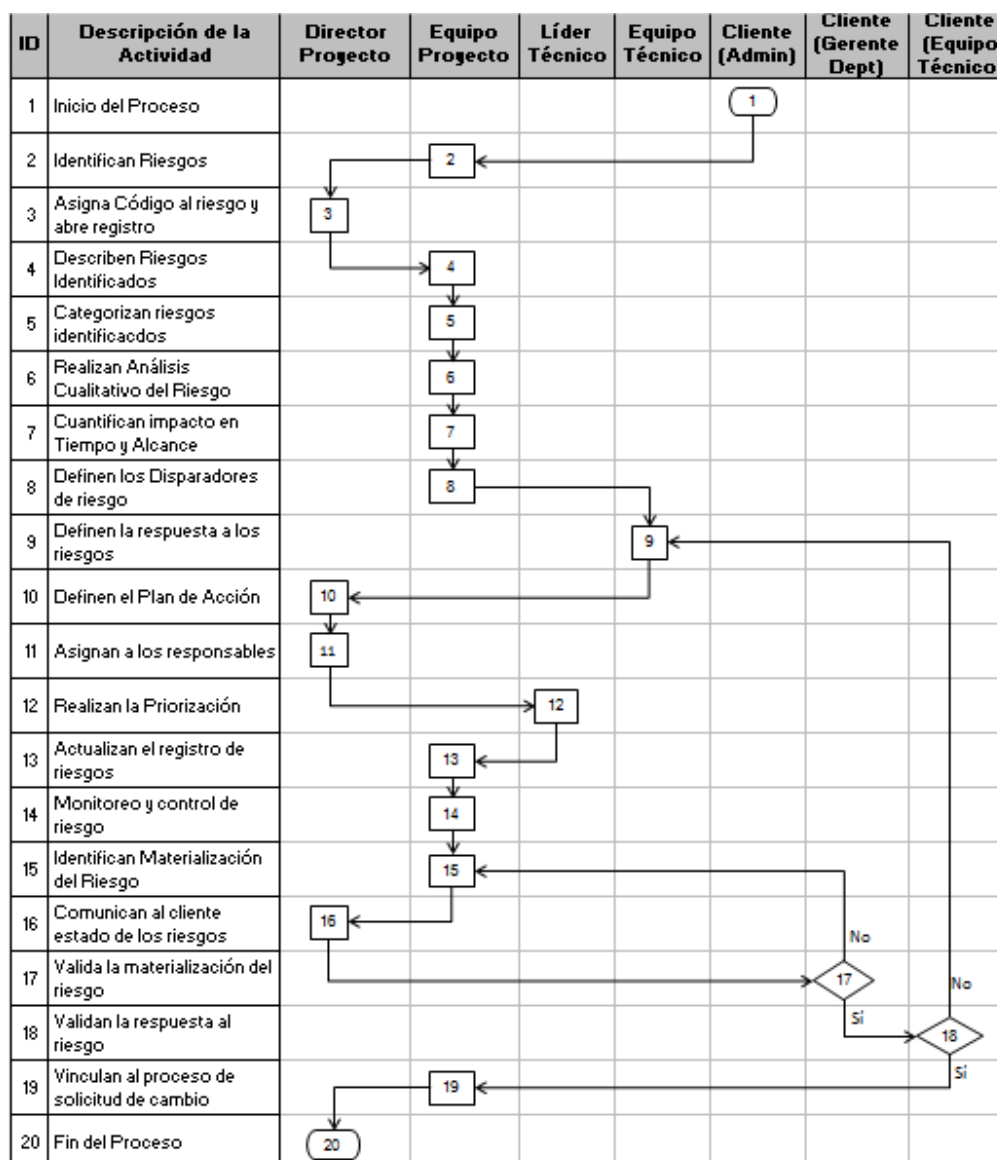
La herramienta se adjunta en digital a este proyecto final de graduación, así como un ejemplo de un caso práctico en el [apéndice](#) cinco.

Esta herramienta arroja datos que permiten entender la confiabilidad de terminar el proyecto si se hubiese utilizado un método determinístico versus uno probabilístico, permite estudiar para diferentes tiempos el grado de confiabilidad para la conclusión del proyecto y el tiempo requerido para concluirlo con lo que se considere una confiabilidad aceptable.

Se ha propuesto dentro del proceso, que el líder técnico sea quién estime los tiempos medios, esto debido a que por observación de casos anteriores, el analista tiende a sobre estimar y/o no cuenta con suficiente experiencia en relación a los análisis que realizará. El líder técnico debe proveer la pauta o estimación media a seguir tomando en cuenta el nivel en el que se encuentra el analista que llevará a cabo el análisis, y el analista a en base a su experiencia debe sensibilizar las estimaciones del líder técnico para cada actividad.

3. Proceso de identificación y análisis de riesgos

Cuadro 15. Mapa del proceso para la identificación y respuesta a los riesgos



Fuente: Elaboración propia

Desde la perspectiva técnica ya se ha hecho durante el análisis de la situación actual, una identificación de riesgos que están asociados a problemas de convergencia, esto se incluye dentro de esta sección; sin embargo esto es sólo una categoría de riesgo y es parte de esta propuesta de mejora dar gestión a los múltiples riesgos previsibles en sus diversas categorías a fin de cerrar las brechas entre lo estimado y el resultado final del proyecto.

Para esto se ha creado una plantilla para dar gestión a los diferentes riesgos identificados del proyecto. Esta plantilla se muestra a continuación y un ejemplo de su utilización se ha incluido en el [apéndice](#) cuatro de este proyecto final de graduación.

Cuadro 16. Matriz de identificación y respuesta a los riesgos

Nombre del Proyecto: Estudio de Fatiga por Alto Ciclaje, Eje Código del Proyecto: 2012.001.0001 Fecha de última actualización: 17/Feb/2012									
<i>Escalas Relativas para Cualificación de la probabilidad de ocurrencia e impacto</i>									
Impacto	Probabilidad	Efecto							
0,05	0,1	Muy Bajo							
0,10	0,3	Bajo							
0,20	0,5	Medio							
0,40	0,7	Alto							
0,80	0,9	Muy Alto							
Código	Riesgo	Descripción	Probabilidad de Ocurrencia	Impacto	Exposición al Riesgo	Disparador	Posibles Respuestas	Plan de Acción	Responsables

Fuente: Elaboración propia

Esta plantilla incluye los ítems de:

- Código: Se utiliza un código según la cuadro diecisiete de este trabajo final de graduación.
- Título del Riesgo: Título para identificación rápida del riesgo
- Descripción del riesgo: Descripción detallada del riesgo
- Probabilidad de Ocurrencia e impacto: Escala relativa mostrada en el cuadro cinco de este proyecto final de graduación en la sección de análisis y procesamiento de datos. “Escala relativa para cuantificación de la incertidumbre en la definición del alcance e identificación del riesgo.”
- Exposición al riesgo: Resultante de la combinación entre la probabilidad de ocurrencia y el impacto, se clasifica según la matriz de probabilidad e impacto del cuadro quince en el apéndice cinco de este proyecto final de graduación.
- Disparadores: Indicador materialización del riesgo.
- Posibles Respuestas: Las posibles respuestas se clasifican en evitarlo, reducirlo, asumirlo, transferirlo y obtener mayor información. Se prioriza según Plan A, Plan B y Plan C.
- Plan de Acción: Estrategias y acciones concretas para mitigar el riesgo.
- Responsables: Persona asignada para dar seguimiento al estado del riesgo.

Cuadro 17. Códigos para categorías de riesgo

<i>Categoría</i>	<i>Código</i>	<i>Sub-Categoría</i>	<i>Código</i>
Técnico	.01	Requisitos	.01
		Tecnología	.02
		Complejidad e Interfases	.03
		Desempeño y fiabilidad	.04
		Calidad	.05
Externo	.02	Subcontratistas y Proveedores	.01
		Normativa	.02
		Mercado	.03
		Cliente	.04
		Clima	.05
Organizacional	.03	Dependencias del Proyecto	.01
		Recursos	.02
		Financiamiento	.03
		Priorización	.04
Dirección de Proyectos	.04	Estimación	.01
		Planificación	.02
		Control	.03
		Comunicación	.04

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, la propuesta de mejora incluye una plantilla para el reporte por materialización del riesgo, cuya intención es vincular este proceso con el proceso de solicitud y control de cambios del proyecto que es el siguiente punto en esta propuesta de mejora. El reporte por materialización de riesgo incluye los siguientes aspectos:

- Valor de exposición al riesgo según matriz de riesgos
- Causa de materialización
- Respuesta al riesgo utilizada
- Acción correctiva requerida
- Requerimiento de solicitud de cambio

Cuadro 18. Plantilla de reporte por materialización de riesgos

Exposición al riesgo según Matriz de Riesgos:
<div></div>
Riesgo previamente identificado. Si __ No __
Causa de materialización:
<div></div>
Respuesta al riesgo utilizada:
<div></div>
Acción correctiva requerida:
<div></div>
Requerimiento de solicitud de cambio
<div></div>
<div></div>
_____ Firma Gerente de Proyecto
_____ Firma Gerente Administrativo (Cliente)

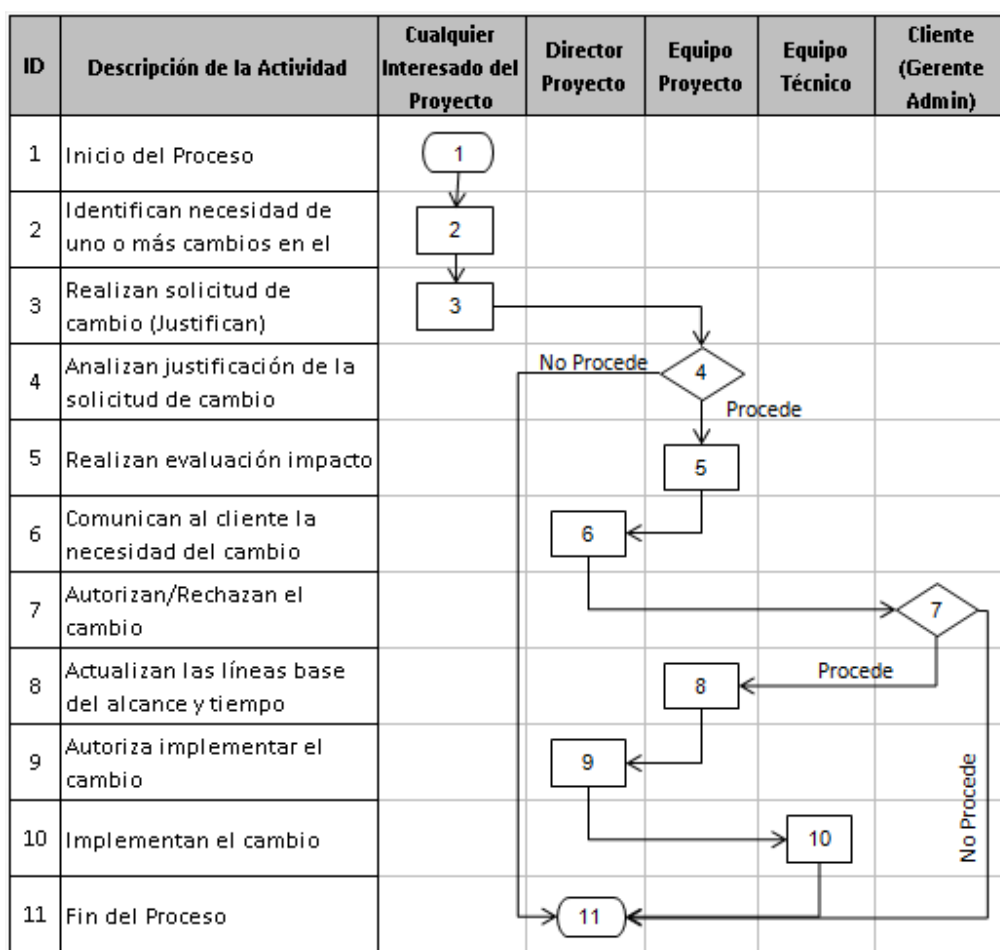
Fuente: Elaboración propia

4. Proceso para el control de cambios

Dada la naturaleza de este tipo de proyectos los cambios a la línea base del alcance y del tiempo son frecuentes, por lo que parte de esta propuesta de mejora incluye darle gestión a los mismos mediante la realización de un proceso para el control de los cambios en el proyecto.

A continuación se muestra el mapa del proceso para el control de cambios.

Cuadro 19. Mapa del proceso para el control de cambios



Fuente: Elaboración propia

La solicitud de cambio puede ser identificada y presentada por cualquier interesado del proyecto, y debe ser analizada en función a su justificación; para esto se ha realizado la siguiente plantilla de solicitud de cambio:

Cuadro 20. Platilla para la solicitud de cambio

Código de Solicitud: _____
Fecha de presentación de solicitud: _____
Solicitante: _____
Estado de la solicitud: _____
Concepto: <div></div>
Descripción: <div></div>
Justificación: <div></div>
Detalle de impacto en el proyecto: <div></div>
_____ Firma Gerente de Proyecto
_____ Firma Gerente Administrativo (Cliente)

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

G. Conclusiones

1. En relación al **primer objetivo específico**; se identificaron los elementos en el ciclo de vida de un proyecto genérico de análisis de integridad estructural que introducen más variabilidad en las estimaciones de tiempo y definición del alcance. Estos son:

- Elementos de alta incertidumbre en la estimación del tiempo
 - Mallado
 - Propiedades de materiales
 - Solución
- Elementos de alta incertidumbre en la definición del alcance
 - Definición del problema y necesidad
 - Definición de los criterios técnicos de aceptación
 - Definición preliminar de puntos críticos
 - Análisis e interpretación de resultados
- Riesgo de no convergencia, que introduce incertidumbre tanto a la estimación del tiempo como a la definición del alcance
 - Tipos de análisis
 - Enfoque

2. En relación al **segundo objetivo específico**, se realizó un proceso para la definición del alcance como parte de la propuesta de mejora. La mejora va orientada puntualmente a dos aspectos clave:

- La primera es que ahora se siga un procedimiento estándar que incluye los siguiente elementos mínimos:
 - Enunciado del alcance
 - Levantamiento de requisitos y entregables

- Definición de los criterios técnicos de aceptación
- Definición de los tipos y cantidad de análisis
- Definición preliminar de puntos críticos
- Definición de componentes y partes a incluir
- Definición del enfoque
- Valoración preliminar del enfoque
 - Tabla de complejidad
- Reconocimiento del cliente sobre la incertidumbre asociada al enfoque seleccionado
- Documentación de la línea base del alcance
- La segunda, es precisamente la inclusión de una valoración preliminar del enfoque por medio de una tabla de complejidad y el reconocimiento del cliente sobre la incertidumbre asociada a la solución del problema y con esto los potenciales cambios a la línea base del alcance.

3. En relación al **tercer objetivo específico**, la propuesta de mejora se ha realizado mediante el modelo PERT como modelo de estimación por medio de métodos probabilísticos para enfrentar la incertidumbre de la estimación de tiempos.

En el proceso se ha propuesto que el tiempo medio sea establecido por el líder técnico, mientras que la sensibilización de los escenarios optimista y pesimista tome lugar bajo las estimaciones del analista o equipo de trabajo.

Se elaboró una herramienta de cálculo y se sometió a prueba en un caso real sencillo de entrenamiento, replicando un proyecto realizado en el año dos mil nueve para una compañía de la industria energética donde se utilizó originalmente una estimación de tiempo sencilla, presupuestando doscientas noventa y cinco horas para la duración total del proyecto de análisis.

Los datos se muestran en el [apéndice](#) cinco de este proyecto final de graduación.

Los tiempos medios se dejaron intactos, pero se pidió al analista en entrenamiento que sensibilizara los escenarios optimista y pesimista. Tras el empleo de la herramienta PERT de estimación, se estimó que para concluir el proyecto con una confiabilidad de noventa y nueve punto noventa y ocho por ciento eran necesarias trescientas cincuenta y seis horas. El proyecto de entrenamiento se concluyó con trescientas setenta y siete horas.

Estos resultados se muestran tabulados a continuación:

Cuadro 21. Caso real, modelo determinístico vs PERT.

	Estimación Inicial (hrs)	Resultado final (hrs)	Diferencia (hrs)	Diferencia porcentual
Determinístico	295	377	-82	28%
PERT	356	377	-21	6%

Fuente: Elaboración propia

Es posible observar que para este caso, se mejoró la estimación de tiempos de una diferencia porcentual del veintiocho por ciento a sólo un seis por ciento.

4. El **cuarto objetivo específico** de la propuesta de mejora incluye un proceso para la identificación y análisis de riesgos; puesto que dada su materialización se impacta de forma directa a las estimaciones iniciales de tiempo e introduce posibles cambios a la línea base del alcance, que son los aspectos medulares de este proyecto final de graduación. Es importante recalcar, que previo a la propuesta de mejora no se realizaba ningún proceso para dar gestión a los riesgos del proyecto.

La propuesta de mejora consta de la identificación y condensación de la información asociada a los riesgos en una sola matriz que permite darles trazabilidad, proponer acciones de mitigación y de respuesta.

Se han realizado cuatro ejemplos sobre su uso mostrados en el [apéndice](#) cuatro de este proyecto final de graduación.

También se ha realizado una plantilla para reportar los riesgos materializados y su respectiva vinculación al proceso de control de cambios.

5. Finalmente, esta propuesta de mejora cierra con el **quinto objetivo específico** planteado dentro de este proyecto final de graduación. Un control de cambios que permite la gestión de los mismos, su análisis de impacto y trazabilidad.

Puntualmente, para esto se desarrolló un mapa de proceso, y una plantilla. Anterior a este proyecto final de graduación no se contaba con ningún procedimiento para dar gestión a los cambios del proyecto.

Un aspecto importante resulta del hecho de que cualquier interesado del proyecto puede iniciar este proceso y debe dársele gestión en función de su justificación e impacto para el proyecto.

Se concluye que mediante este proceso, es posible ahora de una forma ordenada y administrada, entender el impacto que generan los cambios y el efecto neto de la suma de todos los cambios en el proyecto.

Se enfrenta este proceso con formalidad dentro de la organización y se involucra al cliente de manera que sea claro para las partes el impacto que estos cambios tienen sobre el proyecto y la forma en que estos aspectos serán enfrentados o no.

6. Como conclusión general en relación al **objetivo general** de este proyecto final de graduación, se ha definido un conjunto de procesos para la gestión de proyectos de análisis de integridad estructural que conforman la propuesta de mejora y puntualmente son:

- Un proceso para la definición del alcance que incluye una tabla para asociar de forma preliminar la incertidumbre que acompaña al nivel seleccionado de complejidad para abordar el problema. Esto a fin de comunicar a este nivel,

sobre posibles cambios a la línea base del alcance según el enfoque seleccionado.

- Un proceso para la estimación del tiempo, utilizando un modelo probabilístico para enfrentar la incertidumbre; se incluyó también una red genérica de un proyecto de análisis de integridad estructural y una herramienta para la estimación de datos que ayudan a enfrentar y comprender mejor la confiabilidad de las estimaciones.
- Un proceso para identificar, analizar y dar respuesta a los riesgos; acompañado de una herramienta para generar una matriz que permite valorar diferentes categorías de riesgo y sus respectivos planes de mitigación, así como disparadores que den indicación de materialización. También se incluyó una plantilla para dar gestión a los riesgos materializados, que permita iniciar una acción correctiva a los mismos y vincular a un proceso de control de cambios.
- Un proceso de control de cambios, que atiende no solo los riesgos materializados y riesgos de no convergencia, sino cualquiera cambio identificado por algún interesado del proyecto. Estas solicitudes son valoradas en función de su justificación; para esto se ha incluido una plantilla para la solicitud de cambios.

Todos estos procesos han sido orientados a disminuir la incertidumbre de las estimaciones y la cantidad de cambios no controlados asociados a las áreas de alcance y tiempo, las cuales representan la necesidad más inmediata de la empresa Technomeca.

H. Recomendaciones

- Se recomienda a la empresa Technomeca poner en marcha la propuesta de mejora aquí planteada en este proyecto final de graduación.
- Se recomienda, dar trazabilidad a las herramientas, procesos y plantillas aquí generadas, mediante control de versiones, códigos de identificación, y manteniendo las últimas versiones en digital.
- Los documentos, plantillas, mapas del proceso entre otros, en caso de ser impresos deben marcarse con:
 - “Esta versión no controlada de este documento. Puede ser usada sólo como referencia”
- Deben mantenerse los registros firmados en lugares seguros, fuera de posibilidades de deterioro o daño, e idealmente con un respaldo de los registros en digital.
- Se recomienda que las lecciones aprendidas contengan un apartado para valorar el uso y la funcionalidad de la propuesta de mejora.
- Se recomienda a la empresa Technomeca, realizar una valoración después del primer año de uso de estos procesos y de la propuesta de mejora a fin de ajustarla cómo el desempeño y resultados de sus proyectos dictamine.
- Se recomienda a Technomeca, a partir de esta propuesta de mejora, ir paulatinamente las otras áreas de conocimiento y grupos de procesos que han sido excluidas del alcance de este proyecto final de graduación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Bibliografía Citada

ANSYS ®. ANSYS Help Documentation. Versión 10.0, 2006.

Alvarado, Eva de Luz, Canales, Francisca, Pineda, Elia Beatriz. Metodología de la Investigación. México. Organización Panamericana de la Salud, 1986.

Barrantes, Rodrigo. Investigación: un camino al conocimiento, un enfoque cualitativo y cuantitativo. Costa Rica: Editorial EUNED, 2002.

Bittel, Lester. Curso McGraw-Hill de Management en 36 horas. 1a Edición. España: Editorial McGraw Hill.

Chamoun, Yamal. Administración Profesional de Proyectos. La Guía. 1a Edición. México: Editorial McGraw Hill. 2002

Chandrupatla, Tirupathi R., Belegundu, Ashok D. Introducción al Estudio del Elemento Finito en Ingeniería. 2da Edición. México: Editorial Prentice Hall, 1999.

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (1997). Metodología de la Investigación. 2da Edición. México: McGraw Hill

IPMA, AIEPRO. NCB Bases para la competencia en dirección de proyectos. 3ra Edición. España: Editorial UPV. 2009

PMI®. Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK®). 4ta Ed. EEUU: Project Management Institute, Inc. 2008

Sapag Chain, Nassir; Sapag Chain, Reinaldo. Preparación y evaluación de proyectos. 5ta Edición. México: Editorial McGraw Hill. 2008

Shigley, Joseph E., Mischke Charles R. Diseño en Ingeniería Mecánica. 6ª Edición. México: Editorial McGraw Hill. 2002

B. Bibliografía Consultada

Covey, Stephen. Los 7 hábitos de la gente altamente efectiva. 1a Edición. México: Editorial Paidós Mexicana, S.A. 2009

Lledó, Pablo. Director Profesional de Proyectos: Cómo aprobar el PMP sin morir en el intento. 2a Edición. Canadá: el autor. 2009

Méndez, Carlos. (1997). Metodología: Guía para elaborar diseños de investigación en ciencias económicas, contables y administrativas. (2da. Ed.). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.

Beer, Ferdinand P., Johnston, E. Russell, Dewolf, John T. Mecánica de Materiales. 3a Edición. México: Editorial McGraw Hill. 2001.

Pilkey, Walter D. Peterson's Stress Concentration Factors. 2a Edición. New York: John Wiley & Sons, Inc. Editorial. 1997.

Young, Warren C., Budynas, Richard G. Roark's Formulas for Stress and Strain. 7a Edición. New York: McGraw Hill Editorial. 2002.

Singh, Jaspal. An Active Engagement Pedagogy for Introductory Solid Mechanics. Massachusetts Institute of Technology. Febrero, 2002.

Timoshenko, S. Strength of Materials. Reimpresión. Florida: Robert E. Kreiger Publishing Company, Inc. 1976.

C. Bibliografía de Internet

Real Academia Española

<http://rae.es>

http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=metodología

http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=método

MathWorks

www.mathworks.com

<http://www.mathworks.com/products/control/demos.html?file=/products/demos/shipping/control/notchdemo.html>

APÉNDICES

Apéndice 1. Entrevistas, Technomeca.

Entrevista al Ingeniero de Proyectos Mecánicos y Térmicos, y al Ingeniero de Proyectos Dinámicos de la empresa Technomeca

La entrevista se realizó en las oficinas de Technomeca, en Curridabat, San José el día miércoles 11 de enero del 2012.

Se desarrolló una entrevista semi-estructurada de tipo personal, donde se le expuso al entrevistado el propósito de la entrevista y el plan para el manejo posterior de los datos recabados durante la misma.

El tema central esta entrevista es la realización de una “descripción de un ciclo de vida típico de un proyecto de análisis de integridad estructural por el método del elemento finito”.

Adicionalmente se le pidió al entrevistado indicar aspectos relevantes de incertidumbre y elementos que introducen más variabilidad en la estimación del tiempo y en la definición del alcance; esto con el propósito de facilitar la discusión posterior en el grupo de opinión.

Desarrollo de la entrevista

Durante el desarrollo de la entrevista, estos fueron los aspectos puntuales resaltados en la descripción de un ciclo de vida típico de un proyecto de análisis de integridad estructural:

- Típicamente se inicia a través de una reunión de arranque o kick-off que básicamente se realiza para entender muy bien el problema y para el desarrollo de los criterios de aceptación.
- Seguidamente se realiza una definición preliminar sobre cuales aspectos podrían resultar críticos para la integridad estructural del diseño. Posibles modos de falla y puntos críticos del diseño.
- Se realiza una definición sobre cuántos componentes de hardware incluir y se realizan consideraciones sobre el/los tipos de análisis y sobre el modelado en función del entorno y volumen de control y de los resultados esperados.
- En ocasiones el cliente provee de modelos CAD, pero en ocasiones diversas es necesaria su confección.
- Los modelos CAD deben ser traducidos a un ambiente FEA. Esto se puede realizar de diferentes formas y usualmente es necesario probar más de una para que las geometrías puedan ser importadas de la forma más limpia para una discretización posterior. En ocasiones resulta complejo este proceso, especialmente para ensambles grandes donde hay que reparar la geometría dentro del ambiente FEA lo cual es bastante laborioso, pero este no es tan frecuente.
- Se realiza una definición de las condiciones generales de modelado, cómo si se realizará un análisis estático o transitorio, lineal o no lineal, el requerimiento de análisis térmicos, las condiciones de frontera y carga, simplificaciones, asunciones y limitaciones, tiempo de elementos a utilizar, el modelado de las interfaces y superficies de contacto.
- Caracterización de Materiales. Este es un aspecto complejo y de alta incertidumbre pues en ocasiones los clientes cuentan con sus propios laboratorios de desarrollo y caracterización de materiales, pero en la gran mayoría de los casos no es así. Es necesaria aquí la determinación de las propiedades físicas elásticas o inelásticas, las propiedades mecánicas en función de los resultados esperados y asunciones basados en la disponibilidad de datos de material y formas.
- A todo el proceso de modelado matemático de los fenómenos físicos, se le debe acompañar con soluciones analíticas, cálculos manuales, diagramas de cuerpo libre, flujo de cargas, entre otros.
- Una vez que reunimos estas condiciones podemos proceder con el mallado o discretización del continuo. Este aspecto puede cambiar significativamente de acuerdo a los resultados, pues es posible que la malla confeccionada no capture de forma confiable los gradientes de esfuerzo o la rigidez del continuo,

entre otras, y en tal caso habría que valorar la posibilidad de tener que generar una nueva malla o bien poder realizar un sub-modelo.

- Una vez confeccionada la malla, hay que realizar una verificación preliminar para evitar errores en la formulación del modelo matemático.
- Paso siguiente es el modelado del fenómeno físico, donde es preciso estimar las cargas y las condiciones de frontera las cuales pueden cambiar de forma significativa los resultados y representan un factor importante de riesgo. Aquí también se confeccionan rutinas macro para el modelado del fenómeno físico.
- Es importante mencionar aquí que en caso de necesitar realizar varios tipos de análisis se dan varios posibles escenarios en relación a la malla, donde en ocasiones podemos realizar varios análisis con un solo modelo discreto, sin embargo esto no siempre es así. Dependiendo de cada caso en particular y de los fenómenos que queremos observar así debe ser la correspondencia entre las mallas y los análisis, por lo que podemos tener que generar varias mallas para poder realizar los diferentes tipos de análisis.

A manera de ejemplo, para un análisis transitorio, deseamos una malla gruesa y liviana en términos del tiempo de procesamiento, dado que son estos tipos de análisis son muy pesados e inclusive podría pensarse en simplificaciones de simetría del modelo; mientras que para un caso estático en particular, donde se desea observar ver el efecto de aceleraciones que no son consistentes con dicho tipo de simplificaciones por simetría, tendríamos que realizar otras consideraciones en relación a la malla. Primero; cómo tiempo de solución será mucho menor, podemos jugar con una malla mucho más refinada y por ende observar los resultados con una mejor resolución y segundo, las simplificaciones por simetría podrían ser inconsistentes con la dirección de la aceleración por lo que ya dicho modelo no nos permitiría realizar ese tipo de análisis y debemos confeccionar uno, solamente para dicho caso particular.

- Solución. Este puede ser el aspecto más crítico, los problemas de convergencia pueden tener un impacto importante en el tiempo y en costo, entre más complejo sea el problema aumenta la incertidumbre y el riesgo por estos problemas de convergencia. Aquí, se realiza una definición sobre las opciones y algoritmos de solución.

A manera de ejemplo, para una carcasa compleja de un cliente líder mundial en la industria de la energía, se tardó un mes y medio únicamente logrando la convergencia del modelo. Esto acarrea varios aspectos a tomar en cuenta; cuando se introducen variantes para procurar la convergencia del modelo se podría fácilmente sesgar los resultados, por lo que es importante un ojo crítico y revisión minuciosa en esta parte del proceso de análisis.

- Luego de lograr convergencia de la solución, sigue la etapa de Post-Procesamiento.

Tal vez resulta conveniente aquí mencionar que dentro del ambiente FEA todos los aspectos que tienen que ver con la confección del modelo y que son previos proceso de solución se agrupan dentro de un proceso macro que se conoce cómo pre-procesamiento, luego viene la solución, y después todo se categoriza dentro de post-procesamiento.

- En la etapa de post-procesamiento, se realiza una verificación preliminar de los resultados a fin de observar que se exhiba un comportamiento esperable en relación a la solución analítica y en caso de no ser así, se debe determinar que podría causar las diferencias y volver a la solución. También aquí se verifica que la malla sea apta para la confiabilidad de los resultados en los puntos de interés capturando adecuadamente el fenómeno físico y se verifica el error asociado; en caso de no ser así es necesario volver al punto de discretización del continuo o bien considerar la opción de hacer un sub-modelo. Ambas opciones tienen sus bondades y dificultades.
- Una vez que se genere confiabilidad en los resultados observados se procede a ver en detalle los desplazamientos totales y direccionales, así como las distribuciones de esfuerzo, separación de estados de esfuerzo nominal y concentrado, esfuerzos de sección, modos de vibración, frecuencias, entre diversos otros, según sea cada caso y los modos de falla esperados.
- Luego se realiza un aseguramiento sobre la calidad de los resultados mediante una lista de verificación.
- La etapa siguiente consiste del análisis e interpretación de los resultados, donde los resultados se evalúan en función de los criterios de aceptación, se realiza un estudio de los diferentes modos de falla que puedan presentarse según el entorno y condiciones de operación de cada diseño.

Aquí pueden surgir varios escenarios, de acuerdo a cada diseño en particular. Aquí hay algunos a manera de ejemplo:

- Se acepta el diseño o componente
- El diseño no cumple el/los criterios de aceptación y es necesario formular alternativas de re-diseño y potencialmente re-analizar varias opciones y hacer una selección costo/beneficio o bien realizar optimización.
- El análisis no es concluyente y es necesario realizar otro tipo de análisis complementarios.
- Los resultados no son congruentes con los datos experimentales de laboratorio (en caso de existir y de su disponibilidad) y es necesario realizar análisis de cotejo.
- Los modos de falla estudiados pueden sugerir la necesidad de otro tipo de investigaciones y análisis requeridos (Cómo por ejemplo la necesidad de incluir propiedades plásticas para observar esfuerzos residuales en un régimen transitorio que podrían impactar un problema de Termofluencia).

Finalmente se realiza un reporte técnico de datos que es un documento formal sobre todo el análisis realizado, las consideraciones hechas, el modelo utilizado, los resultados, su discusión, interpretación y en general sobre todo el proceso. Esto se acompaña de una presentación usualmente.

Apéndice 2. Resultado 1, grupo de opinión.

Cuadro 22. Lista de Actividades puntuales que componen un proyecto típico de análisis de integridad estructural por medio del método del elemento finito.

Actividad	Título	Descripción
0	Iniciación	
1	Problema / Necesidad	Entendimiento y discusión del problema y/o necesidad
2	Criterios	Definición de los criterios de aceptación
3	Puntos Críticos	Posibles modos de falla asociados, identificación de puntos críticos del diseño
4	Hardware	Definición del volumen de control y componentes a incluir
5	Tipos de Análisis	Definición de los tipos de análisis a realizar
	5.1	Estático
	5.2	Transitorio
	5.3	Modal
	5.4	Respuesta Forzada
	5.5	Harmónico
	5.6	Térmico
	5.7	Pandeo Lineal
	5.8	Pandeo No-Lineal
	5.9	Dinámica de Rotores
	5.10	Mecánica de fractura
	5.11	Propagación de grietas
	5.12	Sub-modelos
	5.13	...
6	Enfoque	Condiciones de modelado
	6.1	Dimensión del problema (1D, 2D, 3D)
	6.2	Lineal (Deflexiones)
	6.3	No-Lineal (Deflexiones)
	6.4	Elasticidad (Modelo Material)
	6.5	Plasticidad (Modelo Material)
	6.6	Precargas
	6.7	Condiciones de frontera
	6.8	Elementos de Contacto
	6.9	Condiciones de carga
	6.10	Simplificaciones
	6.11	Asunciones
	6.12	Limitaciones
	6.13	Tipos de elementos

	6.14	...
7	CAD	Confección de los modelos CAD
	7.1	Confección a partir de planos
	7.2	Confección a partir de medidas de campo
8	Geometría FEM	Traducción de los modelos CAD a un ambiente FEA y limpieza
	8.1	Importar los modelos del ambiente CAD al ambiente FEM
	8.2	Verificar la geometría y realizar las simplificaciones (bien en CAD o en el FEM)
	8.3	Quebrar los sólidos para mallados hexaédricos
	8.4	Crear conectividad e interfaces entre sólidos o superficies
	8.5	Eliminar todos los elementos geométricos fuera de aquellos a analizar
9	Propiedades Materiales	Caracterización de los materiales involucrados
	9.1	Propiedades Físicas
	9.2	Propiedades Mecánicas
	9.3	Asunciones basadas en la disponibilidad de datos
	9.4	Estimación de propiedades mecánicas no disponibles
	9.5	...
10	Solución Analítica	Validación mediante cálculos manuales
	10.1	Cálculos manuales
	10.2	Diagramas de cuerpo libre
	10.3	Flujos de carga
	10.4	...
11	Malla	Discretización del modelo continuo
	11.1	Tipo de Elementos y opciones del elemento
	11.2	Constantes
	11.3	Modelos de materiales FEM
	11.4	Discretización (# Nodos)
	11.5	Verificación de jacobianos
	11.6	Conectividad
	11.7	...
12	Condiciones de Frontera	De desplazamiento conocido
	12.1	Relaciones amo-esclavo
	12.2	Interacciones de contacto
	12.3	Opciones y definiciones de contacto
	12.4	...
	12.5	...
13	Condiciones de Carga	Cargas puntuales
	13.1	Cargas de tracción
	13.2	Cargas de cuerpo
	13.3	

	13.4	Cargas térmicas
	13.5	...
14	Calidad (Problema)	Aseguramiento de la calidad en la definición del problema y del enfoque de solución
	14.1	Lista de verificación
15	Solución	Formulación, opciones y convergencia del modelo matemático
	15.1	Opciones de solución
	15.2	Tiempo de solución del modelado matemático
	15.3	Convergencia
16	Post-Procesamiento	
	16.1	Verificación preliminar del comportamiento del modelo
	16.2	Cotejo con la solución analítica
	16.3	Malla apta para confiabilidad de los resultados. Error Asociado
	16.4	Desplazamiento Totales y Direccionales
	16.5	Animaciones
	16.6	Esfuerzos VM, Principales, Direccionales
	16.7	Secciones y Linearización
	16.8	Temperaturas
	16.9	Modos de vibración y frecuencias
	16.10	...
17	Calidad (Resultados)	Aseguramiento de la calidad de los resultados a ser entregados
	17.1	Lista de verificación
18	Análisis / Interpretación	Análisis e interpretación de resultados
	18.1	Elaboración de diagramas, cuadros, cálculos y modelos de falla
	18.2	Evaluación de resultados en función de los criterios de aceptación
	18.3	Conclusiones y Recomendaciones
	18.4	...
19	Reporte Técnico	Elaboración del documento con la memoria y descripción del trabajo realizado
	19.1	Elaboración del documento con la memoria y descripción del trabajo realizado
	19.2	Presentación de resultados
20	Final	

Fuente: Elaboración propia con base en la discusión del grupo de opinión con los consultores de Technomeca.

Apéndice 3. Escala relativa utilizada para análisis cualitativo.

La siguiente escala relativa ha sido utilizada para la realización del análisis cualitativo en la identificación de los factores que introducen variabilidad e incertidumbre en las estimaciones iniciales de tiempo, en la definición del alcance y en el riesgo de la no convergencia.



Cuadro 23. Matriz de Probabilidad e impacto

Probabilidad	Amenazas					Oportunidades				
0.90	0.05	0.09	0.18	0.36	0.72	0.72	0.36	0.18	0.09	0.05
0.70	0.04	0.07	0.14	0.28	0.56	0.56	0.28	0.14	0.07	0.04
0.50	0.03	0.05	0.10	0.20	0.40	0.40	0.20	0.10	0.05	0.03
0.30	0.02	0.03	0.06	0.12	0.24	0.24	0.12	0.06	0.03	0.02
0.10	0.01	0.01	0.02	0.04	0.08	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01
Escala relativa	0.05	0.10	0.20	0.40	0.80	0.80	0.40	0.20	0.10	0.05
	Impacto en, al menos, un objetivo del proyecto (C, T y/o Alcance)									

Fuente: Guía del PMBOK®

Apéndice 4. Ejemplo de Matriz de Riesgos

<i>Código</i>	<i>Riesgo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Probabilidad Ocurrencia</i>	<i>Impacto</i>	<i>Exposición al Riesgo</i>	<i>Disparador</i>	<i>Posibles Respuestas</i>	<i>Plan de Acción</i>	<i>Responsables</i>
RI.01.03.001	No convergencia, utilización de contactos	Aumento considerable en la complejidad del sistema	0,700	0,800	● 0,560	Durante la etapa de solución, el modelo no alcanza la convergencia	<ul style="list-style-type: none"> - Plan A: Evitarlo. Sugerir otra opción para la definición de la condición de frontera - Plan B: Reducirlo. Informar al cliente sobre las implicaciones en tiempo y costo en caso de no obtener convergencia y comprometerlo por contrato a aceptar los costos y tiempo adicionales para cumplir con el 	<ul style="list-style-type: none"> - Durante el levantamiento de requisitos, la entrega de la propuesta técnica y oferta económica sugerir opciones para evitar y reducir. - Realizar corridas poco detalladas preliminares de prueba. 	Líder Técnico
RI.02.04.001	Carencia de propiedades de materiales	El cliente no provea la información sobre la caracterización de los materiales	0,5	0,2	● 0,100	Llegar a la etapa de solución FEA sin los modelos de materiales	<ul style="list-style-type: none"> - Plan A: Evitarlo. Pedir la información al cliente con suficiente anticipación e informarlo a cerca del posible atraso en caso de que esta información no se haga disponible. - Plan B: Reducirlo. Crear nuestros propios modelos de materiales en base a nuestra base de datos o información disponible en otras fuentes. - Plan C: Evitarlo. Comprar una base de datos especializada de materiales en caso de estar disponible. - Plan C: Reducirlo. Calcular y estimar 	<ul style="list-style-type: none"> - Durante las reuniones iniciales con el cliente para estudiar y entender el problema, así como reuniones regulares de avance es importante entender si el cliente verdaderamente cuenta con esta información. - Subrayar la importancia de que las caracterización de los materiales a utilizar debe ser suministrada con tiempo. - Ir generando un base de datos dentro de la empresa 	Gerente de Proyecto y Líder Técnico

Código	Riesgo	Descripción	Probabilidad Ocurrencia	Impacto	Exposición al Riesgo	Disparador	Posibles Respuestas	Plan de Acción	Responsables
RI.02.01.001	Carencia de datos en la Interfaz del Diseño	El diseño de el componente adyacente ha sido adjudicado a otra compañía subcontratista. Se requiere de coordinación en los datos de interfaz para la funcionalidad del diseño cómo un todo	0,5	0,8	 0,400	Llegar a la etapa de solución FEA sin las condiciones de frontera correctas, de forma bi-lateral	<ul style="list-style-type: none"> - Plan A: Evitarlo. Informar al cliente sobre la importancia de un adecuado control de las interfases y comprometerlo por contrato a asumir la responsabilidad de brindar la información requerida a las partes o asumir las implicaciones de fallas de funcionalidad, atrasos en tiempo y costo. - Plan B: Reducirlo. Proponer una relación de trabajo estrecha entre las empresas, de colaboración y procurar un adecuado control de la interfaz. 	<ul style="list-style-type: none"> - Informar oportunamente al patrocinador en caso de que exista alguna duda en relación a la información y datos en la interfaz. - Documentar bien y de forma clara las asunciones hechas y la información brindada sobre la interfaz de diseño. 	Gerente de Proyecto y Líder Técnico
RI.03.02.001	No hay disponibilidad de analistas estructurales	Dados los períodos extensos que tarda el proceso de contratación y la poca disponibilidad de recursos de analistas, no contar con personal que realice el trabajo técnico.	0,5	0,2	 0,100	Llegar a la etapa de la creación del FEM sin analistas disponibles	<ul style="list-style-type: none"> - Plan A: Reducirlo. Postponer el inicio del proyecto hasta contar con el personal adecuado. - Plan B: Evitarlo. Sub-contratar a otro profesional. - Plan C: Reducirlo. Contratar y empezar a entrenar y capacitar un ingeniero nuevo dentro de la organización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Informar oportunamente al patrocinador. - Tener una lista de analistas y consultores para un eventual subcontrato. 	Gerente de Proyecto

Fuente: Elaboración propia

Apéndice 5. Estimación y resultados de un proyecto de entrenamiento.

Load Case	Task #	Activity	T(Opt)	T(avg)	T(Pes)	Te	Var	Actuals
	1	Kick-off	2	2	2	2	0	2
	2	- Understanding the Problem						
	3	- SOW						
	4	- Road Map to solution						
	5	Approach	40	40	40	40	0	40
	6	- Analysis Purpose and Approach						
	7	- Criteria						
	8	- Analysis Types and Load Cases						
	9	- Hardware Included						
	10	- Assumptions						
	11	- Limitations						
	12	- Documentation						
	13	Materials	4	4	6	4	0	16
	14	- Materials List						
	15	- Forms and Heat Treats						
	16	- Physical Properties						
	17	- Mechanical Properties						
	18	- Material Models						
	19	FEM	32	40	36	48	114	60
	20	- Import CAD geometry						
	21	- Clean Geometry						
	22	- Settings (Etype, R, Mat, ...)						
	23	- Mesh						
	24	- Checks						
	25	- Documentation						
	26	Analytical Solution	6	8	12	8	1	6
	27	- Load Paths						
	28	- FBD						
	29	- Hand Calcs						
Room Temperature	30	Solution	6	8	12	8	1	8
	31	- BC's						
	32	- Loads						
	33	- Documentation						
	34	- Solve						
	35	Post-Processing	2	5	6	5	0	4
	36	- Deflections						
	37	- Stresses						
	38	- Error Checking						
	39	- Documentation						
	40	Quality		N/A				
	41	- QF 7.3.10						
	42	- QF 7.3.11						
	43	Analysis&Interpretation	3	4	5	4	0	4
	44	- Data, Diagrams, Charts						
	45	- Failure Modes Assessments						
	46	- Comparison to criteria						
	47	- Documentation						

Continuación, apéndice de estimación y resultados de un proyecto de entrenamiento

Steady State	48	Solution	16	24	32	24	7	40
	49	- BC's						
	50	- Loads						
	51	- Documentation						
	52	- Solve						
	53	Post-Processing	2	5	8	5	1	4
	54	- Deflections						
	55	- Stresses						
	56	- Error Checking						
	57	- Documentation						
	58	Quality	1	2	2	2	0	1
	59	- QF 7.3.10						
	60	- QF 7.3.11						
	61	Analysis&Interpretation	1	5	8	5	0	4
	62	- Data, Diagrams, Charts						
	63	- Failure Modes Assessments						
	64	- Comparison to criteria						
	65	- Documentation						
X2 SS (Temp Only & Mechanical Only)	66	Solution	4	5	16	6	1	8
	67	- BC's						
	68	- Loads						
	69	- Documentation						
	70	- Solve						
	71	Post-Processing	2	3	5			4
	72	- Deflections						
	73	- Stresses						
	74	- Error Checking						
	75	- Documentation						
	76	Quality			N/A			
	77	- QF 7.3.10						
	78	- QF 7.3.11						
	79	Analysis&Interpretation			N/A			
	80	- Data, Diagrams, Charts						
	81	- Failure Modes Assessments						
	82	- Comparison to criteria						
	83	- Documentation						

Continuación, apéndice de estimación y resultados de un proyecto de entrenamiento

Transient Cycle	102	Solution	35	40	86	46	56	68
	103	- BC's						
	104	- Loads						
	105	- Documentation						
	106	- Solve						
	107	Post-Processing	8	16	24	16	7	12
	108	- Deflections						
	109	- Stresses						
	110	- Error Checking						
	111	- Documentation						
	112	Quality	1	2	2	2	0	1
	113	- QF 7.3.10						
	114	- QF 7.3.11						
	115	Analysis&Interpretation	8	16	24	16	7	16
	116	- Data, Diagrams, Charts						
X2 Modal Analysis (RT & SS)	117	- Failure Modes Assessments						
	118	- Comparison to criteria						
	119	- Documentation						
	120	Solution	6	8	16	9	3	3
	121	- BC's						
	122	- Loads						
	123	- Documentation						
	124	- Solve						
	125	Post-Processing	3	4	8	5	1	1
	126	- Deflections						
	127	- Stresses						
	128	- Error Checking						
	129	- Documentation						
	130	Quality	1	2	2	2	0	1
	131	- QF 7.3.10						
	132	- QF 7.3.11						
	133	Analysis&Interpretation	8	16	24	16	7	32
	134	- Data, Diagrams, Charts						
	135	- Failure Modes Assessments						
	136	- Comparison to criteria						
	137	- Documentation						

Continuación, apéndice de estimación y resultados de un proyecto de entrenamiento

X3 Bearing Stiffness #2, #3, #28#3	156	Solution	7	8	24	11	8	6
	157	- BC's						
	158	- Loads						
	159	- Documentation						
	160	- Solve						
	161	Post-Processing	3	4	8	5	1	3
	162	- Deflections						
	163	- Stresses						
	164	- Error Checking						
	165	- Documentation						
	166	Quality			N/A			
	167	- QF 7.3.10						
	168	- QF 7.3.11						
X3 Accelerations (Transport, Shock, Survival)	169	Analysis&Interpretation	1	4	5	4	0	4
	170	- Data, Diagrams, Charts						
	171	- Failure Modes Assessments						
	172	- Comparison to criteria						
	173	- Documentation						
	210	Solution	7	8	26	10	5	12
	211	- BC's						
	212	- Loads						
	213	- Documentation						
	214	- Solve						
	215	Post-Processing	5	8	10	8	1	12
	216	- Deflections						
	217	- Stresses						
	218	- Error Checking						
	219	- Documentation						
	220	Quality			N/A			
	221	- QF 7.3.10						
	222	- QF 7.3.11						
	223	Analysis&Interpretation	1	4	5	4	0	5
	224	- Data, Diagrams, Charts						
	225	- Failure Modes Assessments						
	226	- Comparison to criteria						
	227	- Documentation						
Totales			295			377		

ANEXOS

Anexo 1. Grupos de Procesos y Áreas de Conocimiento

Knowledge Areas	Project Management Process Groups				
	Initiating Process Group	Planning Process Group	Executing Process Group	Monitoring & Controlling Process Group	Closing Process Group
4. Project Integration Management	4.1 Develop Project Charter	4.2 Develop Project Management Plan	4.3 Direct and Manage Project Execution	4.4 Monitor and Control Project Work 4.5 Perform Integrated Change Control	4.6 Close Project or Phase
5. Project Scope Management		5.1 Collect Requirements 5.2 Define Scope 5.3 Create WBS		5.4 Verify Scope 5.5 Control Scope	
6. Project Time Management		6.1 Define Activities 6.2 Sequence Activities 6.3 Estimate Activity Resources 6.4 Estimate Activity Durations 6.5 Develop Schedule		6.6 Control Schedule	
7. Project Cost Management		7.1 Estimate Costs 7.2 Determine Budget		7.3 Control Costs	
8. Project Quality Management		8.1 Plan Quality	8.2 Perform Quality Assurance	8.3 Perform Quality Control	
9. Project Human Resource Management		9.1 Develop Human Resource Plan	9.2 Acquire Project Team 9.3 Develop Project Team 9.4 Manage Project Team		
10. Project Communications Management	10.1 Identify Stakeholders	10.2 Plan Communications	10.3 Distribute Information 10.4 Manage Stakeholder Expectations	10.5 Report Performance	
11. Project Risk Management		11.1 Plan Risk Management 11.2 Identify Risks 11.3 Perform Qualitative Risk Analysis 11.4 Perform Quantitative Risk Analysis 11.5 Plan Risk Responses		11.6 Monitor and Control Risks	
12. Project Procurement Management		12.1 Plan Procurements	12.2 Conduct Procurements	12.3 Administer Procurements	12.4 Close Procurements

Fuente: Elaboración propia basado en el PMBOK®

Anexo 2. Ecuaciones utilizadas para el proceso de estimación de tiempos por medio de un modelo probabilístico.

Figura 7. Nomenclatura y Ecuaciones, Método PERT

<i>Ecuaciones utilizadas</i>	<i>Nomenclatura Utilizada</i>
$t_e = \frac{t_o + 4t_m + t_p}{6}$	to: Tiempo optimista de cada actividad
$\sigma_t^2 = \left(\frac{t_p - t_o}{6}\right)^2$	tm: Tiempo medio de cada actividad
$\sigma_T = \sqrt{\sum \sigma_t^2}$	tp: Tiempo pesimista de cada actividad
$z = \frac{T_i - T_E}{\sigma_T}$	te: Tiempo esperado de cada actividad
	TE: Tiempo esperado total
	Ti: Tiempo de muestreo
	σ_t^2 : Varianza de cada actividad
	σ_T : Desviación Estándar total
	z: Distribución de Probabilidad Normal

Fuente: Elaboración propia basada en material del curso de herramientas del programa de Maestría en Gerencia de Proyectos del Instituto Tecnológico de Costa Rica.